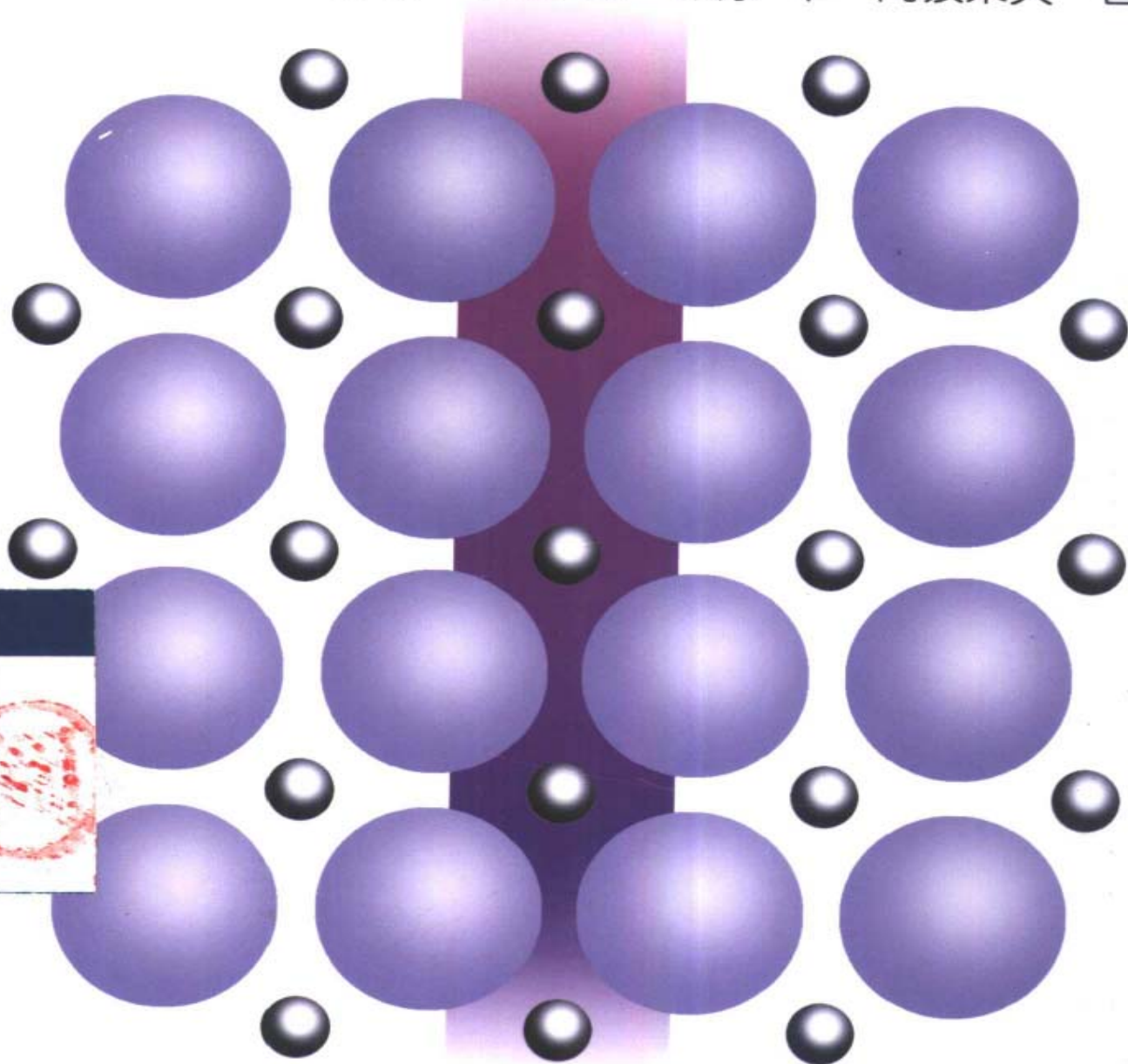


OHM 电子电气入门丛书

图  
解

# 电气理论

〔日〕 福田 务 栗原 丰 向坂荣夫 著



科学出版社

OHM社

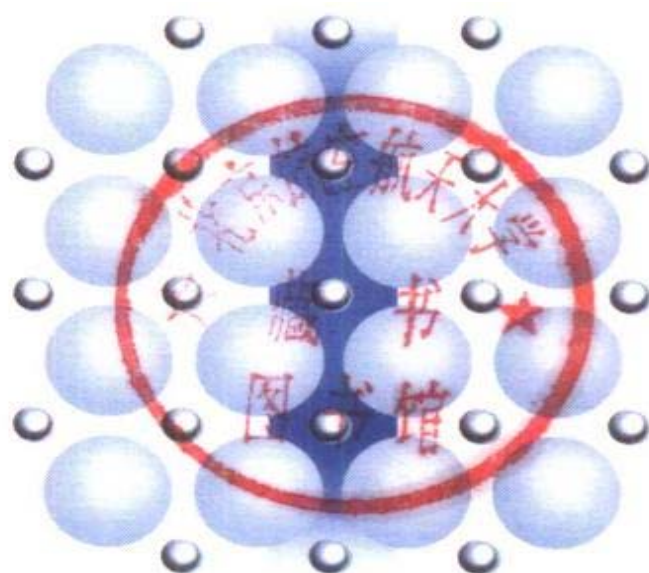
00129181



OHM 电子电气入门丛书

# 图解 电气理论

[日] 福田 务 栗原 丰 向坂荣夫 著  
程君实 译  
朱承高 校



科学出版社 OHM 社

2001 北京



北航 C0547794

FROK/12

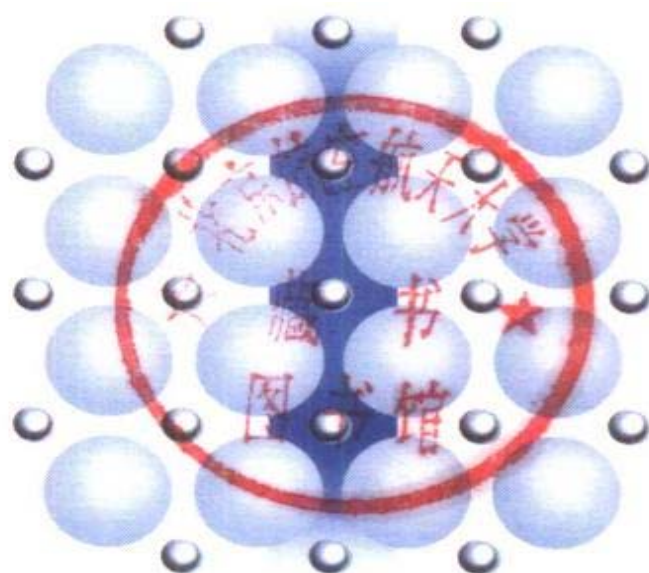
00129181



OHM 电子电气入门丛书

# 图解 电气理论

[日] 福田 务 栗原 丰 向坂荣夫 著  
程君实 译  
朱承高 校



科学出版社 OHM 社

2001 北京



北航 C0547794

FROK/12

## 图字:01-2000-3436 号

Original Japanese edition

Etoki Denki Riron

by Tsutomu Fukuda, Yutaka Kurihara and Shigeo Kousaka

Copyright © 1980 by Tsutomu Fukuda, Yutaka Kurihara and

Shigeo Kousaka

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and

Science Press

Copyright © 2000

All rights reserved

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

## 絵とき 電気理論

福田 務 栗原 豊 向坂栄夫 オーム社 2000 第1版25刷

### 图书在版编目(CIP)数据

图解电气理论/[日]福田 务、栗原 丰、向坂荣夫著;程君实译.

-北京:科学出版社,2001

(OHM 电子电气入门丛书)

ISBN 7-03-009003-9

I. 图… II. ①福…②栗…③向…④程… III. 电气-理论-图解  
IV. TM1-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 81347 号

**科学出版社 OHM 社 出版**

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2001 年 5 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

2001 年 5 月第一次印刷 印张:8 3/4

印数:1—5 000 字数:227 000

**定 价:24.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

## 前 言

常常听到读者这样的呼声,他们说虽然想学习电工学,但电气理论实在太抽象,难以理解。确实,对于开始想学习电工学的读者来说,正因为电本身看不见抓不着,似乎很难降伏。

但是,本书所编写的有关直流及交流的基础理论,都是一些容易理解的内容,只要循序渐近地努力学习,这些内容谁都能够掌握。

对于今后有志于学习电工学的读者,本书选择了直流电路、电与磁、静电和交流电路有关的基础知识详细地加以说明,作为入门的向导。另外,本书编入了尽可能多的附图及照片,采用套色印刷,以便于初学者通过看图就能够理解书中的内容。

本书按照惯例,每一章有一个小结。本书可用作学习参考或教材。时代在前进,但电气理论的定律和法则总是起着指导作用,希望不要仅仅把目光对准眼前的电气产品,也要专心于基础理论的学习。

期待着本书能够使读者增加对电工学的兴趣,增强自己的实力。

本书各篇的执笔分工如下:

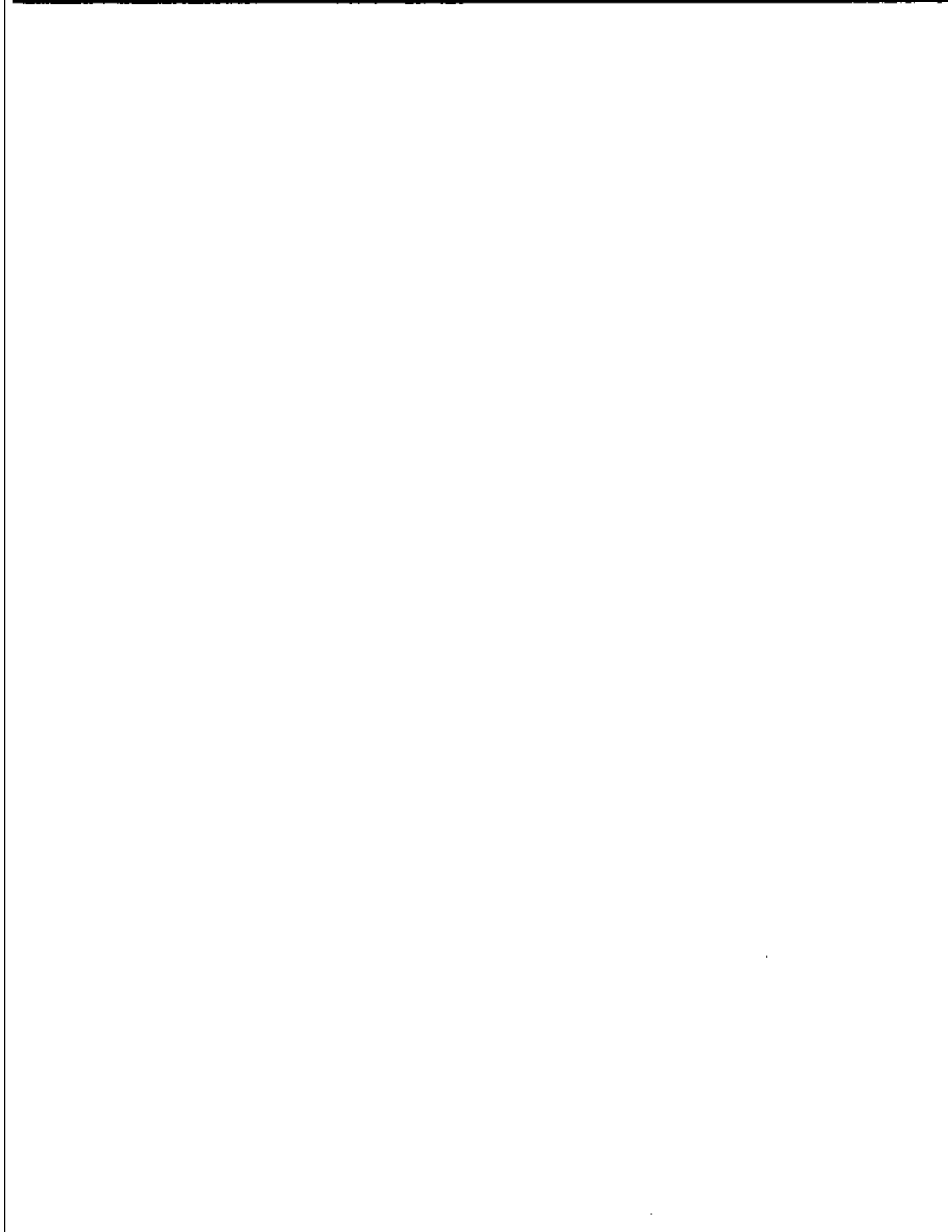
第Ⅰ章及第Ⅱ章 栗原 丰

第Ⅲ章 福田 务

第Ⅳ章 向坂荣夫

最后对为了本书的出版而不辞辛劳并给予指导和帮助的欧姆社(OHMSHA)各位表示衷心感谢。

作 者



# 目 录

## I 直流电路

1.1 电的本质 .....	12
物质的构成/从周期表看电的性质/电子的行为	
1.2 电流、电压与电阻 .....	17
什么是电流/什么是电压/什么是电阻	
1.3 电动势 .....	21
电动势如何产生/各种电池	
1.4 电路构成 .....	25
电路/电路图的表示方法	
1.5 欧姆定律 .....	27
电流与电压成正比/导体的电阻:电阻温度系数及电阻率	
1.6 电阻串、并联电路 .....	31
电阻串联/电阻并联/串并联的等效电阻	
1.7 直流电路的计算 .....	35
电阻上的电压降/电阻并联电路的电流与电压的关系/电阻串并联电路的电流与电压的关系	
1.8 分压与直流电压表 .....	40
分压与直流电压表/电压表与倍压器	
1.9 分流及直流电流表 .....	44
分流/分流器与直流电流表	
1.10 电路的特殊解法 .....	48
利用电桥测量电阻/基尔霍夫定律/叠加原理	
1.11 功率 .....	56
电产生热/功率用电流与电压的乘积表示/电能的表示方法	
1.12 电 解 .....	61

液体中电流能通过吗? / 有关电解的法拉第定律/电解的应用	
1.13 电池构造及正确的使用方法 .....	66
从电池中为什么能得到电流? / 电池的种类/电池的正确使用方法	
1.14 充电的方法 .....	70
电池的使用方法/铅蓄电池的容量及放电率/铅蓄电池的充电方法	
本章小结 .....	75

## II 电与磁

2.1 磁铁的磁场 .....	78
磁极与磁铁的性质/磁力与磁场的关系/磁通与磁场的关系/在地球上为何磁针指南北?	
2.2 金属磁化的条件 .....	83
什么样的金属能构成磁铁/构成磁铁的原因/磁化强度/真空中磁场的强度	
2.3 电流产生磁场 .....	88
电流流过导线而产生磁场/电流的方向决定磁场的方向/磁场强弱	
2.4 磁路构成 .....	93
磁路的原动力是磁通势/磁路中的磁阻/磁路计算	
2.5 线圈产生电动势 .....	98
磁通变化在线圈中产生电动势/感应电动势的方向与大小/线圈中流过电流也产生电压	
2.6 直流电动机的旋转原理 .....	103
磁场与电流的组合/电磁力的方向/电磁力的大小/磁电式仪表的原理	
2.7 阿拉戈圆盘 .....	108
导体在磁场中移动会产生电动势/感应电动势的方向/产生的电动势大小/右手定则的应用/阿拉	



戈圆盘及应用

2.8	作用于平行导体的力 .....	113
	电流流过平行导体会产生力/作用于平行导体 的电磁力/为什么会产生线圈的振动音	
2.9	变压器的原理 .....	116
	相邻绕组中产生感应电动势/变压器的结构/变 压器铁心用薄硅钢片叠成	
2.10	磁性材料的基本性质 .....	121
	磁性材料的磁特性/磁性材料的种类	
	本章小结 .....	125

### III 静 电 .....

3.1	电 荷 .....	130
	摩擦为什么会生电? /电子移动形成电流/由于 带电使质量变化了吗? /非导体容易摩擦生电	
3.2	电荷之间的作用力 .....	135
	库仑定律/静电感应与静电屏蔽/所谓电场	
3.3	电容器的构造 .....	141
	储存电荷的电容器/电容器的构造	
3.4	电 容 量 .....	145
	电容器的电容量/电荷 $Q$ 、电容量 $C$ 与电压 $V$ 的 关系/大量储存电荷的条件	
3.5	电容器串并联 .....	149
	电容器并联/电容器串联/电容器串并联	
3.6	静电的利用 .....	155
	静电的应用范围	
	本章小结 .....	159

## IV 交流电路

- 4.1 直流与交流的比较 ..... 162  
     身边的直流与交流/直流与交流的性质/交流波形的正负与零/直流与交流的电源符号
- 4.2 正弦交流的产生 ..... 167  
     均匀磁场中线圈的移动/交流的产生/产生的电动势用  $\sin$  表示/正弦交流/正弦波以外的波形/速度与角速度
- 4.3 正弦交流电的表示方法 ..... 174  
     频率与周期/瞬时值与最大值/平均值表示/一般用有效值表示电压及电流/角频率与电角度
- 4.4 相 位 ..... 181  
     所谓相位/ $e$  与  $i$  的相位差/相位超前与滞后/瞬时表达式与相位
- 4.5 用矢量及复数表示交流 ..... 186  
     电流  $i_1$  与  $i_2$  的合成/利用瞬时表达式进行合成/利用波形进行合成/矢量表示/复数表示
- 4.6 阻碍交流电流的元件 ..... 195  
     电阻与阻抗/纯电阻电路/纯电感电路/纯电容电路
- 4.7 频率与电抗的关系 ..... 202  
     感抗与频率/电气铁道的阻抗板/容抗与频率/收音机电路的旁路电容器/电抗与相位
- 4.8 交流电路的基本计算 ..... 208  
     RLC 串联电路/RLC 并联电路/电气产品的基本组成要素
- 4.9 电路的特殊现象 ..... 215  
      $\omega L = 1/(\omega C)$  的含义/串联谐振频率/电压增大作用/谐振曲线与选择性/并联谐振
- 4.10 交流功率与功率因数 ..... 222  
     交流电路的功率计算/电气设备容量/什么是功率因数/电力公司与功率因数/功率计算式

4.11	便携式功率表及功率测量 .....	230
	功率表的使用方法/功率表的接线端与插头/功率表的接法/功率表的读数与倍率/25/50[A]的含义/电流线圈及电压线圈的±端	
4.12	安全用电 .....	235
	▽ 标记与 ⊕ 标记/注意多路布线/连接处的松动/注意限流器的颜色/地线连接	
4.13	为什么采用三相交流? .....	239
	插座中是两根电线/三相交流的产生与性质/三相交流表示方法/六根导线可以精简为三根/三相交流的相序	
4.14	三相联结的种类 .....	244
	星形联结/三角形联结/V联结/三相联结的组合	
4.15	三相交流电路的基本计算 .....	251
	对称三相电路/Y-Y电路/Δ-Δ电路/Y-Δ电路及Δ-Y电路/Y-Δ的相互变换	
4.16	三相交流电路的功率及测量 .....	258
	三相功率/功率公式中的常数3与 $\sqrt{3}$ 的区别/三相视在功率及功率因数/两功率表法/功率表指针反转	
4.17	旋转磁场与感应电动机 .....	264
	轮子旋转/磁铁旋转产生的磁场/三相交流产生旋转磁场/旋转磁场反转	
4.18	不对称三相电路 .....	269
	不对称三相电路/不对称三相电路的求解方法/Y联结与Δ联结的负载	
4.19	非正弦交流 .....	273
	所谓非正弦/非正弦交流的分解/基波与高次谐波	
	本章小结 .....	276



# I

## 直流电路

---

一般情况下,掌握电的本质是比较困难的,但它的效应却是用眼睛可以观察到的。

确实,在开始学习电的时候,与做一样东西相比,也许难以理解。但了解了电的性质后,就可以知道身边的电气设备或电器与电的关系。

在本章中将学习便携式收音机或计算机使用的电,即与直流电有关的内容,包括它的产生、电压电流及电阻的关系等,还学习电的效应,即热效应及化学效应的基础知识。另外,照像机的曝光表及手表用的电源和汽车的电源都使用电池,因此本章中还将学习这些电池的结构及使用方法。

# 1.1 电的本质

我们身边的电是怎样产生的？

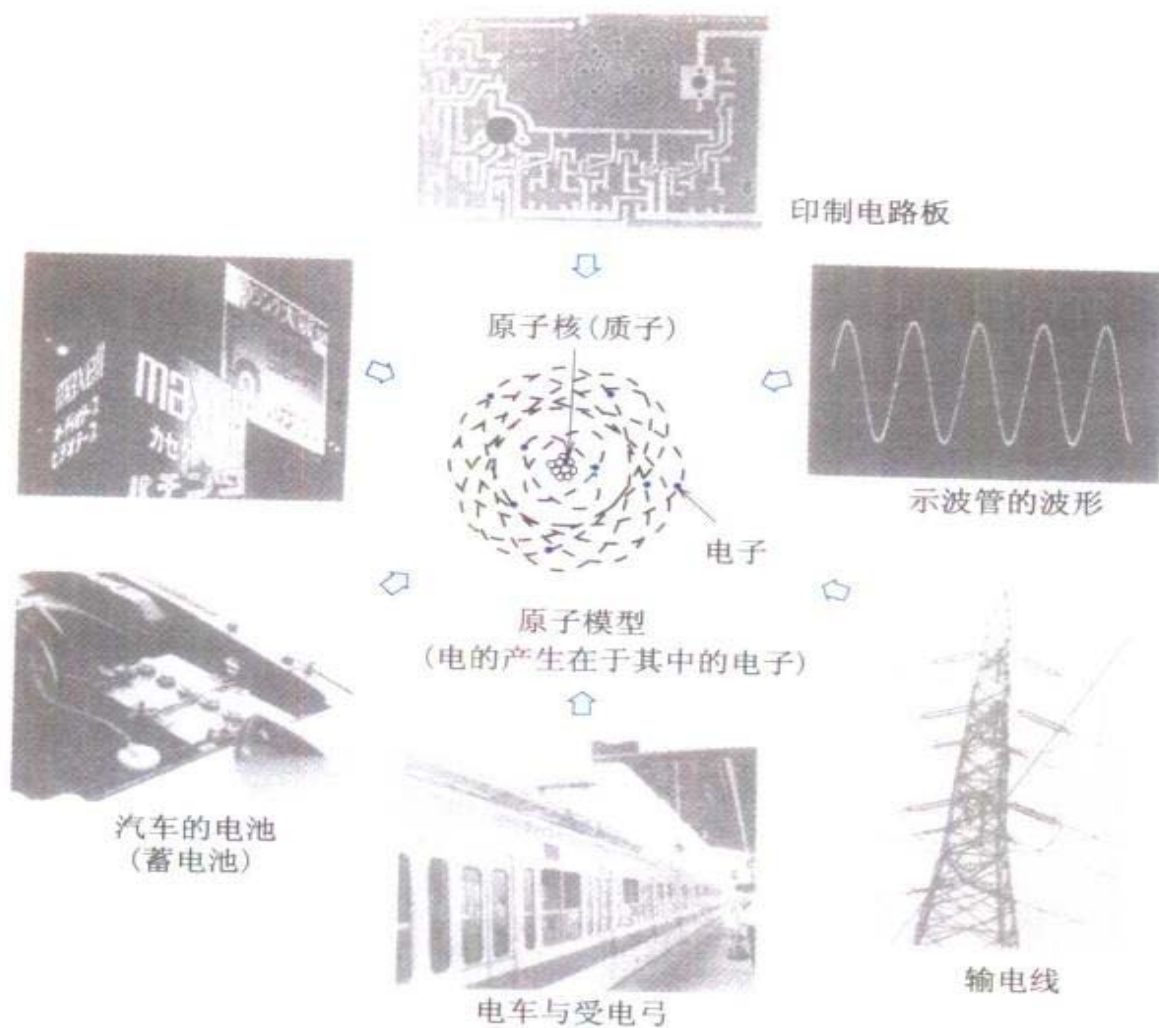


图 1.1 电的各种应用

由于在我们身边到处都使用电,因此有时也可能不知道电的宝贵之处。有一则报道也许让我们记忆犹新,那就是在纽约曾经发生过停电,那时市民在那巨大的大厦中面对寒冷、黑暗及不安呈现出了极度的烦恼。另外,电影《高耸的地狱》中所见到的停电灾难在今日的社会中是否会发生,任何时候这都是一个悬念。所以说电有时成为我们生活中的重要“食粮”,有时也会成为露出獠牙的“恶魔”。在本节中将阐明电的本质。

### 1.1.1 物质的构成

包括我们的身体在内,一切物质若一直细分下去,最后是称为分子的粒子。分子用肉眼几乎看不见,但其还分别具有各物质的性质。若再将物质的分子细分下去,则可以知道,是由称为原子的东西构成。原子与分子不同,其本身不具有各种物质的性质,若干个原子复杂地组合起来构成分子(参见图 1.2)。

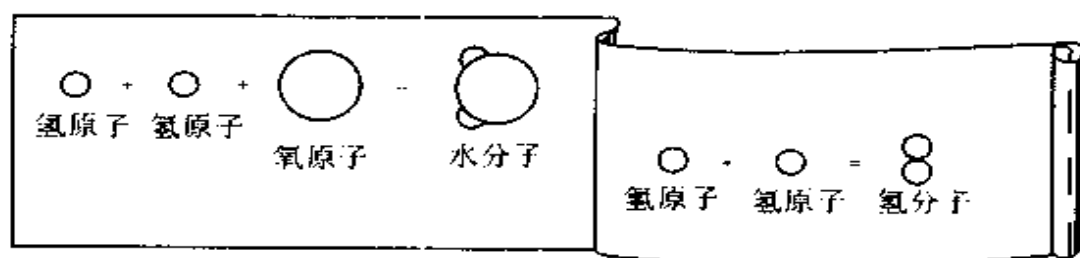


图 1.2 从原子到分子

到 19 世纪为止,认为物质的构成单位是原子,但根据英国科学家汤姆森的实验可知,从原子中会放出更小的超微粒子,该粒子命名为**电子**。以后根据各种研究的结果知道,构成物质的原子是以原子核为中心,电子沿一定轨道绕原子核旋转。再进一步研究可知,原子核中由带**正电**的质子及不带电的中子构成,而电子带**负电**。一般原子中原子核具有的质子(正电)数与电子(负电)数相等,相互吸引,形成不带电的中性(参见图 1.3)。

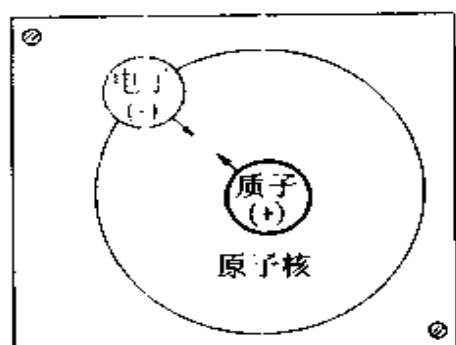


图 1.3 电子与质子的中和

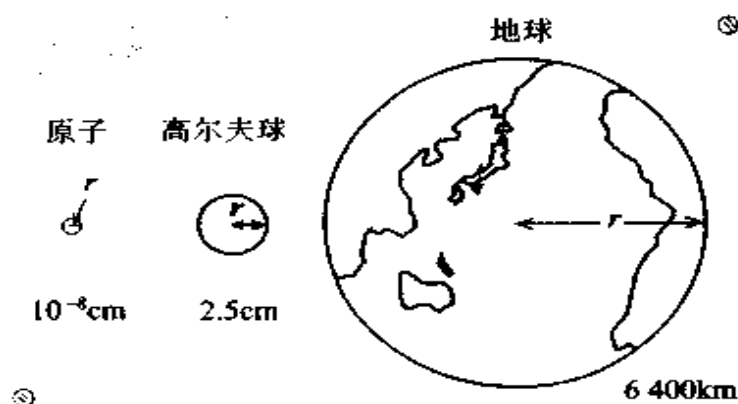


图 1.4 原子的大小

若比较原子与电子的大小,则如图 1.4 所示,原子与高尔夫球的比例和高尔夫球与地球的比例相当。原子核的大小约为原子直径的  $1/10000$ ,是质子与中子的紧密结合体。电子的质量为  $9 \times 10^{-31} \text{ kg}$  左右,大小及重量几乎可以忽略,而电量与质子所具有的电量相同。

### 1.1.2 从周期表看电的性质

原子是物质的基本单位,由原子核与电子构成,根据其不同组合,形成各种物质。将该物质称为元素,包括天然及人工的在内大约有 100 多种。对于性质类似的元素组,若观察其电子排



列,发现有周期性现象。将其归纳形成周期表,图 1.5 为周期表的一部分,表中原子序数与电子数一致。

原子序数 → 13 符 号 → Al 元 素 名 → 铝 原 子 量 → 26.9815 电子排列 → 2·8·3			
28 Ni 镍 58.70 2·8·16·2	29 Cu 铜 63.546 2·8·18·1	30 Zn 锌 65.38 2·8·18·2	31 Ga 镓 69.72 2·8·18·3
	47 Ag 银 107.868 2·8·18·18·1	48 Cd 镉 112.41 2·8·18·18·2	

图 1.5 元素周期表的一部分

图 1.6 所示为铜(电子数 29,电子排列 2·8·18·1)。电子所绕的轨道从靠近原子核起向外依次命名为 K、L、M、N…壳

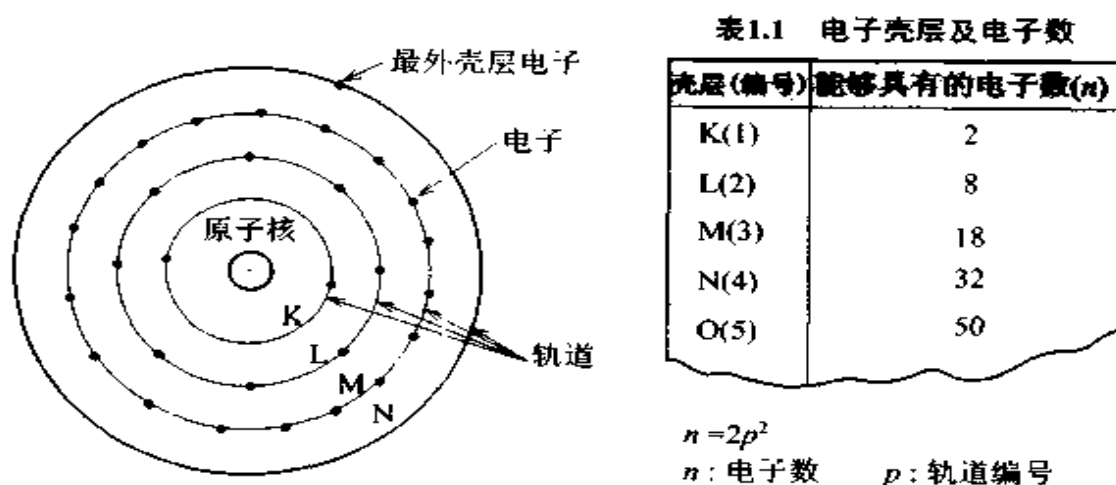


图 1.6 铜的原子模型

层,能够具有的电子数如表 1.1 所示。沿最外侧轨道旋转的电子称为**最外壳层电子**(也称为**外壳层电子**或**价电子**)。如铜那样有 1 个或者几个最外壳层电子的情况,受原子核的吸引力较弱,因而该电子容易脱离轨道。像在铜和银那样的金属中,将离开特定的原子核的束缚而在原子间自由流动的价电子称为**自由电子**。

### 1.1.3 电子的行为

若从中性状态的原子失去电子,则剩下的原子表现出正电(+)的性质;反之,若从外部有 1 个以上的电子进入中性状态原子的轨道中,则该原子的电子数多于质子数,表现出负电(-)的性质。从周期表来看,金属的价电子容易脱离,非金属的价电子与原子核的连接紧密,没有自由移动的电子。

图 1.7 所示为电子与原子核的关系。

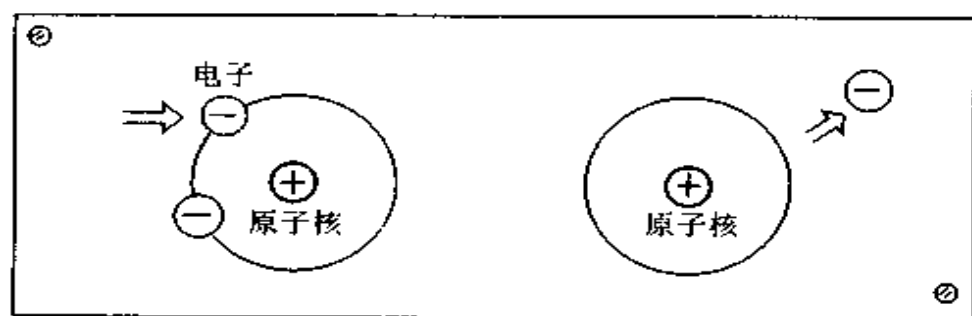


图 1.7 电子与原子核的关系

# 1.2 电流、电压与电阻

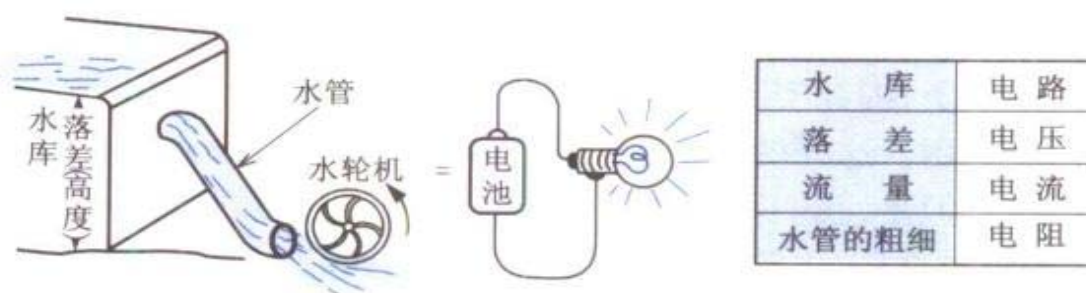
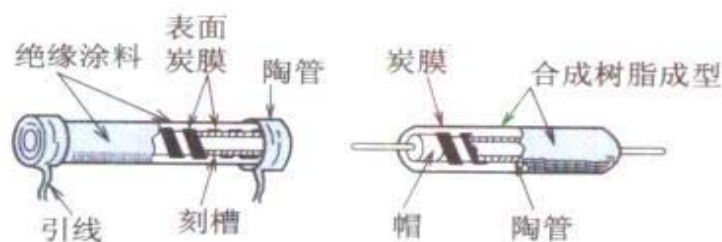
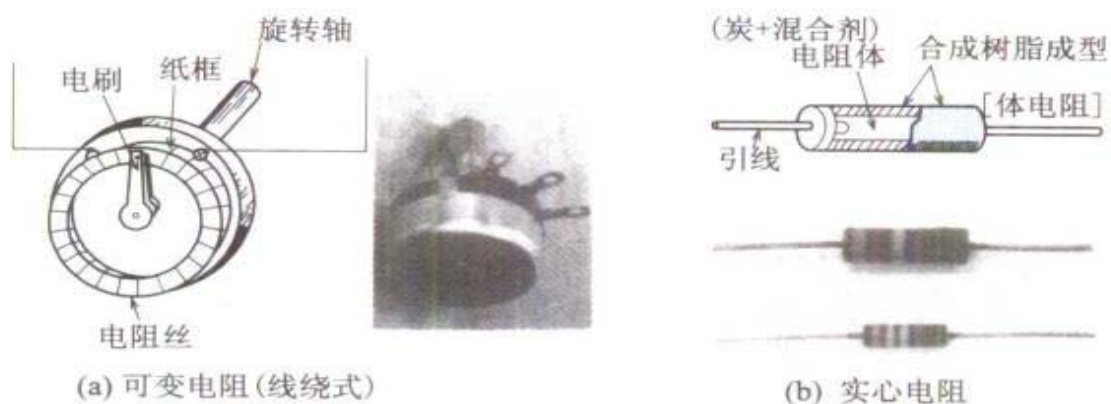


图 1.8 水坝与电路的比较



(c) 炭膜电阻

图 1.9 各种电阻器

### 1.2.1 什么是电流

如图 1.10 所示,若用电线将干电池与小灯泡相连,则众所周知小灯泡将点亮。研究一下它的原理,可以明白下面的结果。在上一章中学习了自由电子,在电线(铜线)的电子排列中,最外圈电子数少,容易变成自由电子。电线中的自由电子带负电,因此一起被拉向电池的阳极一侧开始运动。另外,从电池的阴极不断地供给电子,因此实际上电线中的自由电子不过是承担运送电池电荷的作用。这样的电子流动称为**电流**,该流动是从电池阴极流向阳极。但是,我们习惯上将电子流动的反方向规定为**电流的方向**,因而结论是“电流从电池的阳极流向阴极”。

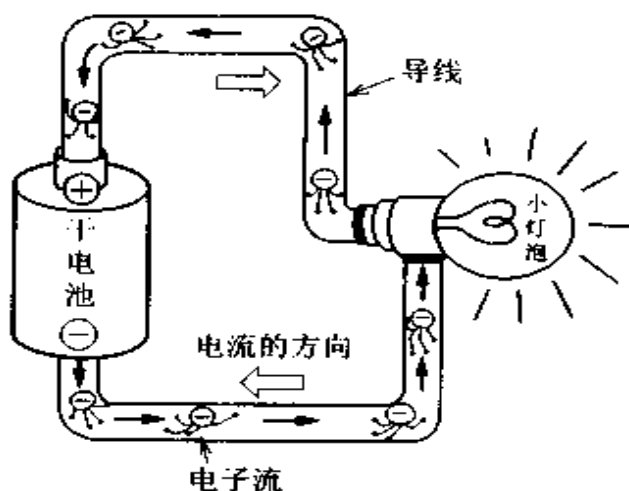


图 1.10 电子与电流

#### • 电流的大小 用 1s

内通过某一截面的电荷量来表示。表示电流大小的单位采用安培(单位符号为 A)。

1A: 为 1s 内有 1 库仑的电荷移动的电流大小。由于 1 个电子具有的电荷约为  $1.6 \times 10^{-19}$  库仑, 因此 1 库仑的电荷为  $1/1.6 \times 10^{-19}$  个, 即  $6.25 \times 10^{18}$  个电子具有的电量。

库仑为电荷量的单位,

用符号 C 表示。

现在若设  $t$  秒钟有  $Q$ [C] 的电荷移动, 则由于 1s 移动的电荷量为电流  $I$  的大小, 因此

$$I = \frac{Q}{t} [\text{A}]$$

### 1.2.2 什么是电压

电池具有使电流流动的作用。其理由是, 电子集中分布在电池的阴极, 呈现负电性质。阳极处于带正电荷的状态, 因此若用

电线将阳极与阴极相连,则电荷产生移动。因而,若用电线将图 1.10 所示的小灯泡与电池相连,就有电流流过,这样的电的压力就是电压。电压的单位是伏特(单位符号为 V)。另外,将任意点电的压力值称为该点的电位,任意两点间的电位之差称为电位差。单位都用伏特表示。

图 1.11 所示为将水槽的水从几个取水口放水的情况,可知水深越深,水压越大,则放水量也越多。电压的情况也相同,通过将干电池叠加,电压就变大。

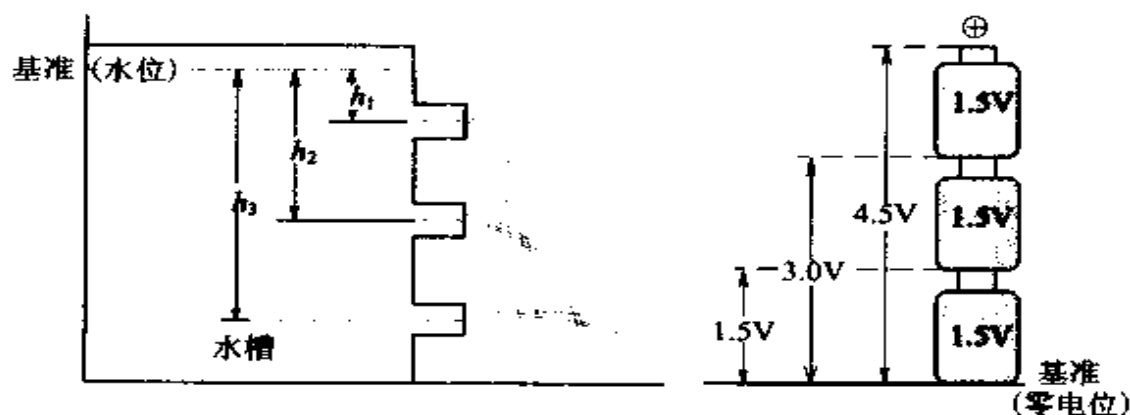


图 1.11 水压与电压的关系

### 1.2.3 什么是电阻

一般金属容易导电,是由于自由电子沿金属原子轨道旋转,这一点很容易理解。但由于物质种类不同,最外圈电子的数量也不同,不会是一样的。通电还是不通电,则取决于材料中存在的自由电子的数量。一般状态下的导体多多少少具有阻碍电流流通的作用。其阻碍程度称为电阻。单位采用欧姆(单位符号为  $\Omega$ )。当该导体流过 1A 的电流,需要 1V 的电压时,这时的电阻值称为  $1\Omega$  的电阻。

(a) 导体·半导体·绝缘体 金、银、铜、铝、铁那样的很容易使电流流过的物质称为导体。作为电路导线用的铜,电阻小,又比较便宜能够购得,因此是代表性的导体。除金属以外,在液

体中如盐水、酸、将碱溶于水的液体等,由于能够通电,因此也看作导体。玻璃、橡胶、纸、木棉、塑料、陶瓷类等几乎不通电,因此这些物质称为非导体或绝缘体。而像硅、锗那样,处于导体与绝缘体之间,有时为导体,有时成为绝缘体,这样的物质称为半导体。

**(b) 各种电阻器** 电阻器是电气设备中一种重要的元件。电阻器大致可分为两种,一种是具有固定电阻值的固定电阻器,另一种是可以在一定范围内改变电阻值的可变电阻器。图 1.9 的(a)为可变电阻器,(b)及(c)为固定电阻器。

- **电阻器的材料** 采用锰铜丝、康铜丝、镍铬合金丝等那样的金属丝及炭膜等材料,这些材料的电阻值较大,且随温度等的电阻变化小。

- **电阻器的使用** 一旦随便乱用而流过大电流,则会过热或烧坏,因此必须特别注意。在铭牌上或电阻器表面标有电流或功率的额定值。图 1.12 所示为滑线电阻器及炭膜电阻的铭牌及额定值。

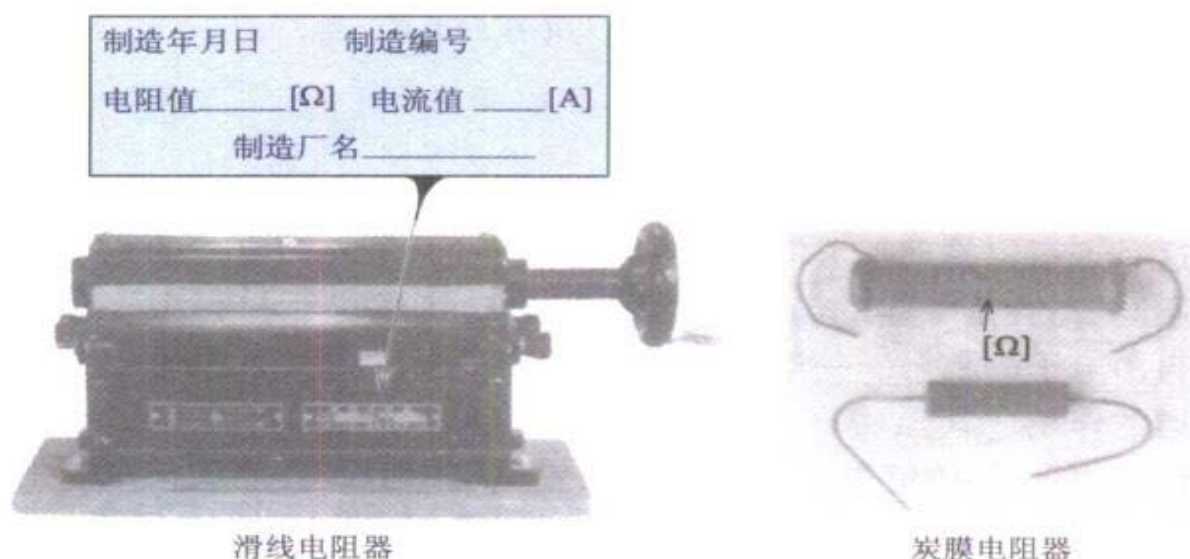


图 1.12 电阻器的铭牌及额定值

# 1.3 电动势

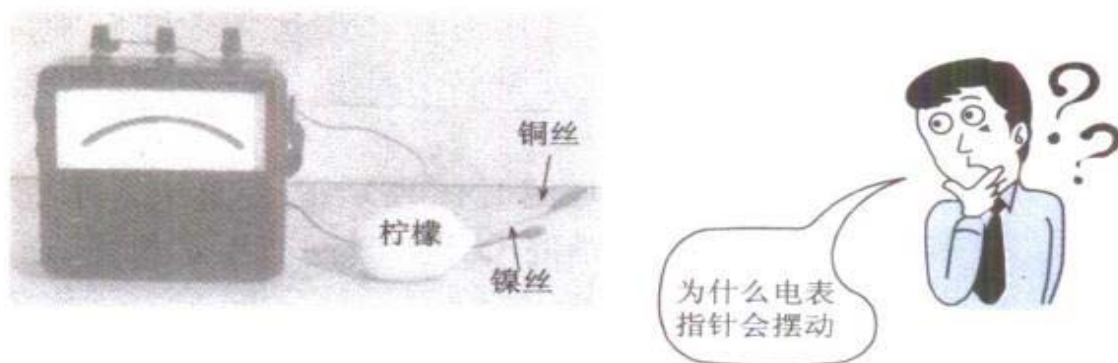


图 1.13 柠檬产生的电动势

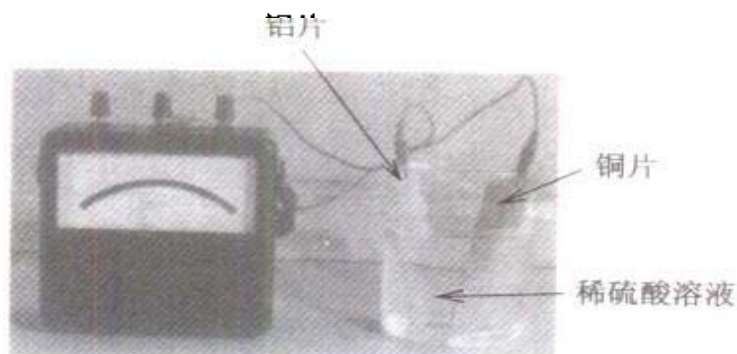




图 1.14 电的产生

表 1.2 水量与电量的比较

	水 量		电 流		水 量		电 流
1	雾雨 ↓ ↓ 大地	每分钟 0.001cc 水 $10^{-6}l$	$1\mu A$ [ $10^{-6}A$ ] ( $\mu$ :微)	4	自来水 (大口径) ↓ ↓	每分钟 1 000l 水 $10^3l$	$1kA$ [ $10^3A$ ] (k:千)
2	小雨 ↓ ↓ 大地	每分钟 1cc 水 $10^{-3}l$	$1mA$ [ $10^{-3}A$ ] (m:毫)		发电厂的水量  水坝		
3		每分钟 1 000cc 水 1l	$1A$	5			

所谓电动势,英语为“electromotive force”,即产生电的力。例如,若从图 1.15 的带电体 A(带有电荷的物体)用电线与大地相连,则瞬间有电流流过,但马上电流就消失。即电位差没有了,变为 0。换句话说,是因为正电荷与大地的负电荷中和,使电荷的移动消失。但是,若如图 1.13 所示,用铜丝和镍丝刺入柠檬中,在其间连接电压表,则指针偏转。该偏转方向也始终一定,即铜为正极,镍为负极。

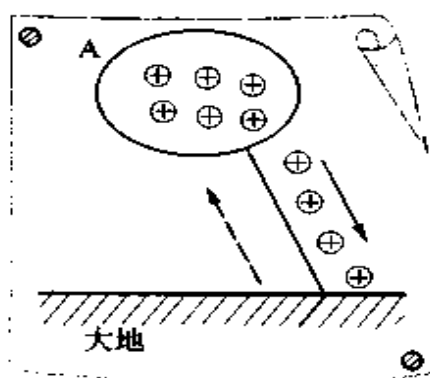


图 1.15 电荷的移动

如图 1.16 所示,若用泵从 A 水槽向 B 水槽供水,则 AB 间产生水位差,通过通道 C 使水位差消失,即产生了水流。若持续使该泵旋转,则连续不断地产生水流。若用电线将小灯泡连接在干电池的正端与负端之间,则电流流过,小灯泡持续点亮。就像水流中的泵的作用那样,用干电池以保持电位差。这样的作用称为**电动势**。电动势的大小与电位差相同,用伏特(单位符号为 V)表示。

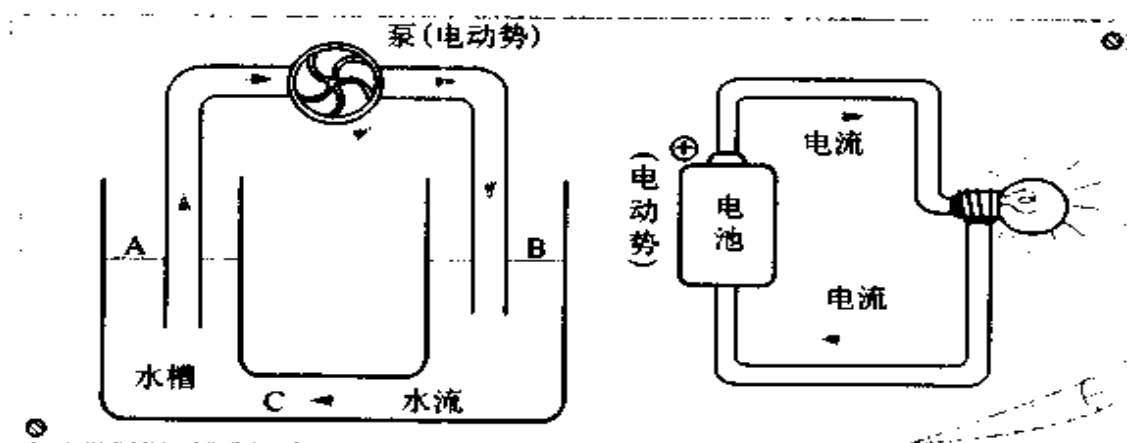


图 1.16 泵与电池的比较

### 1.3.1 电动势如何产生

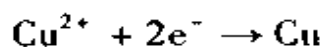
如图 1.14 所示,若在稀硫酸溶液中插入铝片及铜片,并如图那样连接电压表,则指针偏转。根据这一现象,来分析金属及溶



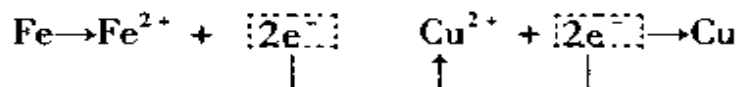
液的机理。

一般金属容易产生自由电子,且容易溶于酸中。另外,在第1章中学习了具有成为正离子(原子带电荷的性质)的趋势。如图1.17所示,若在装有硫酸铜溶液的试管中放入铁钉及铂片,则在铁钉表面附着有铜,而铂片上什么变化也没有。这是为什么呢?

在硫酸铜水溶液中,铜作为铜离子  $\text{Cu}^{2+}$  而存在。该离子为了作为单质而析出,离子必须接受两个电子



在该实验中,由于铁钉上附着了铜,而铂片上未附着铜,因此铁能够将电子给铜离子,而铂却不能。



$\text{Pt} \rightarrow$  没有变化

根据这一情况可知,铁比铜更容易变成离子,而铂比铜更难以变成离子,将该情况称为“铁比铜的电离趋势大,铂比铜的电离趋势小”。若研究各种金属的电离趋势,则得到图1.18所示的结果。

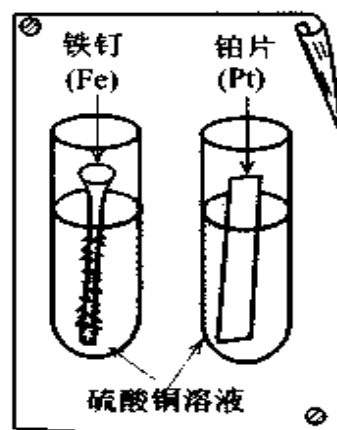


图1.17 金属的变化

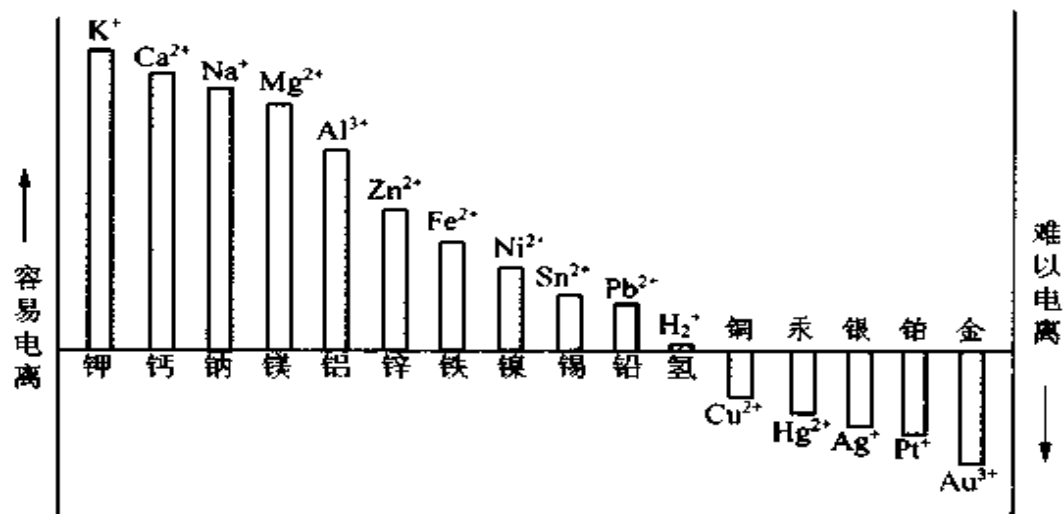


图1.18 金属的电离趋势

电离趋势之差越大的金属,离子移动进行得越厉害,因此可知,电的力即电动势越大。所以可以知道,插入柠檬的镍丝与铜丝之间产生的电动势要小于铝丝与铜丝之间产生的电动势。

### 1.3.2 各种电池

具有电动势的电池在我们的生活中存在各种形式。详细的原理等将在后面的章节叙述,这里仅介绍概要情况。



图 1.19 棒球的投接手组合(battery)

电池是根据前述金属的电离趋势,将电离趋势之差大的两种金属(电极)浸在电解液(不一定是水溶液)中而制成。1 个电池称为单体电池(cell),1 个单体电池产生的电压近似一定,取决于各种金属材料,在 1~2V 的范围内。若形状增大,则容量增加,但电压不变。如果单体电池产生的电压能达到几 V 或几十 V,就非常理想了,但非常困难。因此为了提高产生的电压(电动势),就应该将该单体电池叠加起来制成。两个以上单体电池的组合称为电池组(battery)。这与英文中棒球的投接手组合(battery)是同一个词,即所谓构成组合(参看图 1.19)的意思。表 1.3 所示为各种电

池。

表 1.3 各种电池

干 电 池	锰干电池,汞电池,层叠电池,空气电池
蓄 电 池	铅蓄电池,碱蓄电池
燃料电池	利用氢与氧化合时产生的热
太阳电池	将光能直接变为电能

产生电动势的方法中,有一种是像电池那样利用化学手段产生,还有一种是像发电机那样利用物理手段产生电能。

# 1.4 电路构成



图 1.20 自然界中水的循环路径

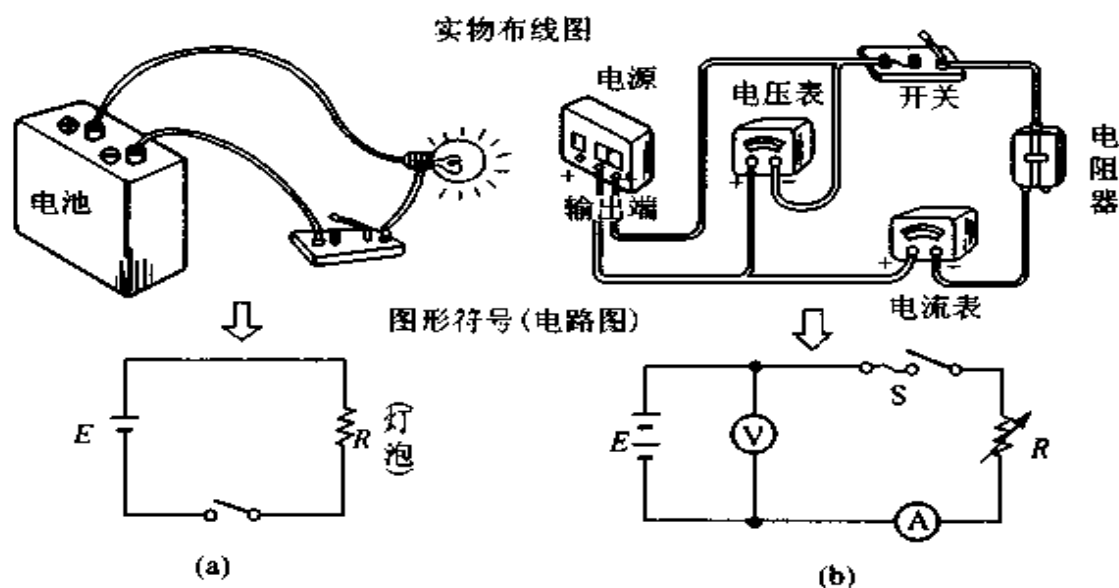


图 1.21 电路

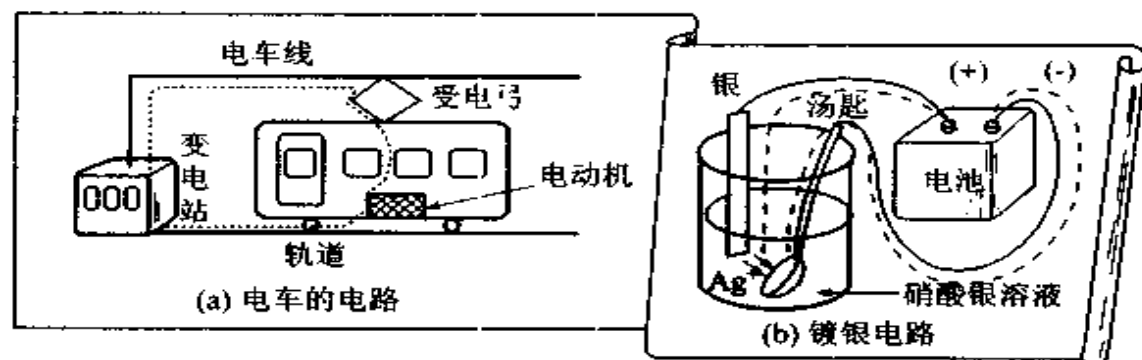


图 1.22 实际的电路

### 1.4.1 电 路

电是严格遵循规则的,从电源流出的电流经过负载又回到电源。在自然界存在图 1.20 所示的水的循环路径。

在图 1.21 中,图(a)是通过开关用导线将干电池与小灯泡连接,图(b)是用电线将带熔丝的开关及电阻器与直流稳压电源连接,测量电路的电压及电流。其中电池或直流稳压电源是产生电压的,即为**电源**,一旦开关接通,则电流流过导线,使得小灯泡点亮,或使电表指针偏转。像小灯泡点亮那样,使吸尘器或电冰箱工作也都是由于流过电流的作用,将小灯泡、吸尘器及电冰箱称为**负载**。

因而,若将开关接通,则从电源正极有电流通过负载流至电源负极,将该电流流过的路径称为**电路**(也可称为回路)。

• **电流表及电压表的连接方法** 如图 1.21(b)所示,电流表是测量流过电路的电流大小的仪表,连接在电源正端与负载之间,或连接在负载与电源负端之间。电压表是测量电路内电压大小的仪表,连接在电源的两端或负载的两端。两种情况下都特别要注意极性。

图 1.22(a)为电车的电路,虚线表示从变电站经电车线、受电弓及电动机又回到变电站的电流流动路径。图(b)是镀银的电路,电流从电池正极经银、硝酸银溶液,再通过汤匙回到负极。

### 1.4.2 电路图的表示方法

若用图画来表示电路,则非常麻烦,有时还因在物品的背面而很难看得见,因此用规定的图形符号表示。图 1.23 所示为主要的图形符号。

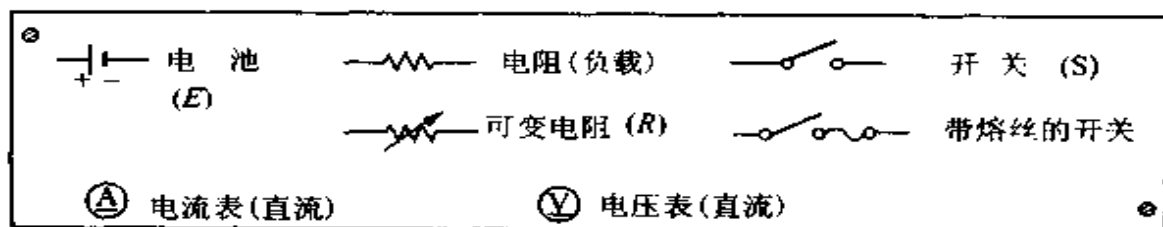


图 1.23 主要的图形符号

# 1.5 欧姆定律

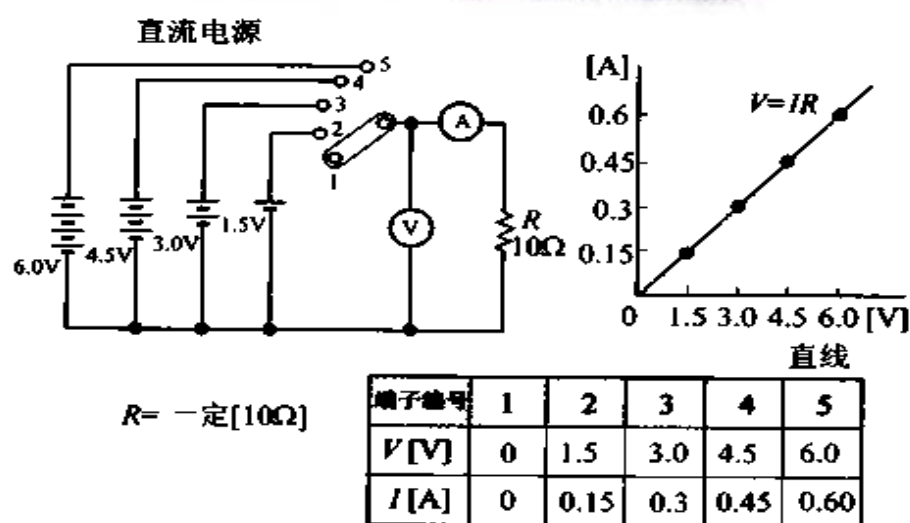


图 1.24 欧姆定律的实验

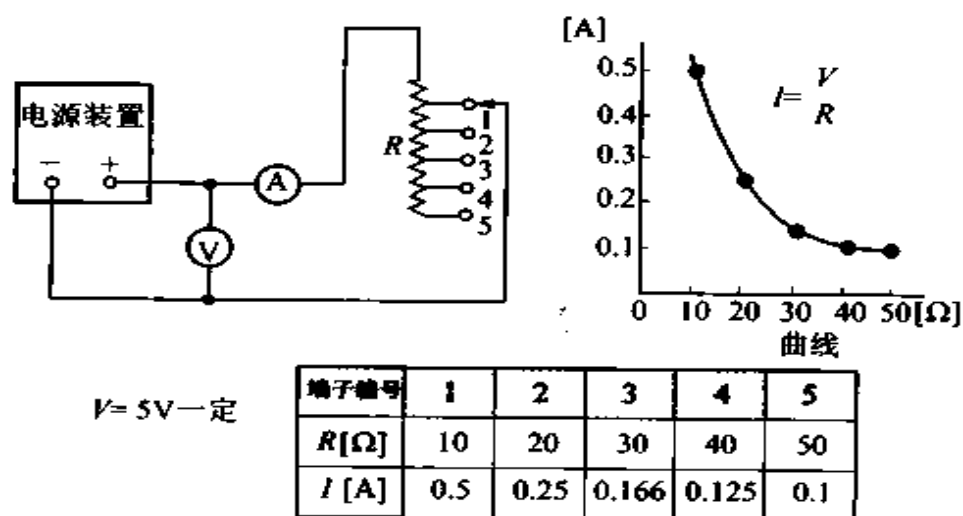


图 1.25 应用实验

### 1.5.1 电流与电压成正比

如图 1.24 所示,在将具有若干档电压的电源、开关、电压表、电流表及电阻连接而成的电路中,若研究加在电阻上的电压与流过电流的关系,则电压表及电流表的读数如图 1.24 中的表所示。这种情况下  $V/I = 1.5/0.15 = 3.0/0.3 = 4.5/0.45 = 6.0/0.6 = 10$ 。

这是电压与电流之比,这个量用以表示阻碍电流流动作用的大小。这个值称为电阻,单位用欧姆(单位符号为  $\Omega$ )。 $1\Omega$  的电阻是加上  $1V$  电压时、流过  $1A$  电流情况下的电阻。图中直线表示电压与电流的关系。由图可知,电压与电流成正比。这一关系用下式表示:

$$V = IR \quad [V]$$

式中, $V$  为电压, $I$  为电流, $R$  为比例常数(电阻)。

在图 1.25 中,将电压固定( $5V$ ),改变电阻来研究电流与电阻的关系。这里必须注意的是,不能使  $R=0$ 。 $R=0$  的状态称为电路处于短路状态,这是绝对要避免的。由图 1.25 的曲线及表格可知,存在下式的关系:

$$I = \frac{V}{R} \quad [A] \quad R = \frac{V}{I} \quad [\Omega]$$

这些公式是前述公式的变形。

将以上的电压、电流及电阻的关系系统地加以总结的是德国科学家欧姆( $1787 \sim 1854$ ),根据他的名字定名为**欧姆定律**,这已为大家所熟知。这是学习电气知识的人最初需要记住的最重要的定律。

电路中流过电流的大小与电压成正比,与电阻成反比。

利用欧姆定律,若知道电路中的电压、电流及电阻中的两个量,就可以通过计算求出另外一个量。下面所示为其计算例题。

**例题1** 在图 1.26 所示的电路中,  $5\Omega$  电阻与  $3.0\text{V}$  电源电压相连, 求此时流过电路的电流。

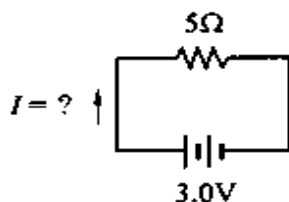


图 1.26

**解答:** 根据欧姆定律  $V = IR$ , 由题目已知条件可知

$$3.0 = 5 \times I$$

所以 
$$I = \frac{3}{5} = 0.6$$

——→ 流过的电流为  $0.6\text{A}$

**例题2** 若在某电阻两端加上  $10\text{V}$  的电压, 流过  $1\text{mA}$  的电流, 求该导体的电阻。

**解答:** 根据欧姆定律  $V = IR$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{10}{1 \times 10^{-3}} \\ = 10 \times 10^3$$

——→ 电阻为  $10\text{k}\Omega$

### 1.5.2 导体的电阻: 电阻温度系数及电阻率

导体的电阻具有随温度而变化的性质。一般, 金属导体随温度上升, 电阻增加, 而半导体则相反, 电阻随温度上升而减少。这是因为, 若温度上升, 则在物质结构上来说, 金属中自由电子的运动受到阻碍。而相反, 在半导体中, 自由电子的运动则变得活跃。

在金属导体中, 从  $-20^\circ\text{C}$  至  $200^\circ\text{C}$  左右的范围内, 电阻变化相对于温度变化的比例为一一定值。因此, 若以温度为  $20^\circ\text{C}$  (常温) 时的电阻值  $R_{20}$  为基准, 设上升  $1^\circ\text{C}$  时的电阻增加量为  $r[\Omega]$ , 则该  $r[\Omega]$  相对于  $20^\circ\text{C}$  的电阻之比值  $\alpha_{20}[^\circ\text{C}^{-1}]$  如下式所示:

$$\alpha_{20} = \frac{r}{R_{20}} \quad (\alpha_{20}: 20^\circ\text{C} \text{ 的电阻温度系数})$$

以  $20^{\circ}\text{C}$  为基准, 温度上升至  $T[^{\circ}\text{C}]$  时的电阻增加量为

$$r(T - 20) = \alpha_{20} R_{20} (T - 20)$$

$T[^{\circ}\text{C}]$  时的电阻  $R_T[\Omega]$  为

$$\begin{aligned} R_T &= R_{20} + \alpha_{20} R_{20} (T - 20) \\ &= R_{20} [1 + \alpha_{20} (T - 20)] \quad [\Omega] \end{aligned}$$

电表及测量仪器等所用的电阻, 若因温度而发生变化, 则会产生误差, 因此采用温度系数极小的锰铜丝或阿范斯 (Advance) 电阻合金丝。

• **电阻率** 根据各种实验证实, 电阻与导体的截面积成反比, 与其长度成正比。这个现象与水流的情况非常相似。水在流动中, 管道越粗, 越容易流动。水流的路程越长, 管道对水的阻力越大。因而, 电阻  $R[\Omega]$  与导线截面积  $A[\text{m}^2]$  及长度  $l[\text{m}]$  满足下述关系:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad [\Omega]$$

式中,  $\rho$  (读音为 rou) 称为电阻率, 单位用欧·米 (单位符号为  $\Omega \cdot \text{m}$ )。

• **电导率** 是表示电流容易通过的程度, 用电阻率的倒数表示。 $\sigma$  (读音为 sigma) 称为电导率, 单位用西门子每米 (单位符号为  $\text{S/m}$ ) 表示。

$$\frac{1}{\rho} = \sigma \quad [\text{S/m}]$$

实用上, 电导率以标准纯铜<sup>1)</sup> 为基准, 用百分比表示电导率<sup>2)</sup>。表 1.4 所示为电阻率及电导率的代表性例子。

表 1.4 导体的电阻率、电阻温度系数及电导率

导体名称	电阻率 $\rho$ $\times 10^{-8} [\Omega \cdot \text{m}]$ ( $20^{\circ}\text{C}$ )	电导率 $\sigma$ [%]	电阻温度 系数( $20^{\circ}\text{C}$ )	比 重 ( $20^{\circ}\text{C}$ )
银	1.62	104.2	0.003 8	10.5
铜	1.69	100	0.003 93	8.92
铝	2.62	64.5	0.003 9	2.7
铂	4.77	35.5	0.003 3	10.2
锌	6.1	27.7	0.003 7	7.14
镍	6.9	24.5	0.006	8.9
铁	10.0	16.9	0.005	7.86
铂	10.5	16.0	0.003	21.45

1) 铜是采用国际标准纯铜。——译者注

2) 是指相对电导率。——译者注



# 1.6 电阻串、并联电路

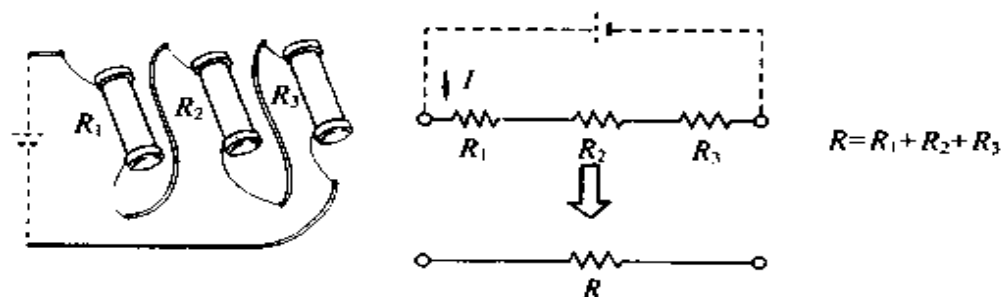


图 1.27 串联等效电阻

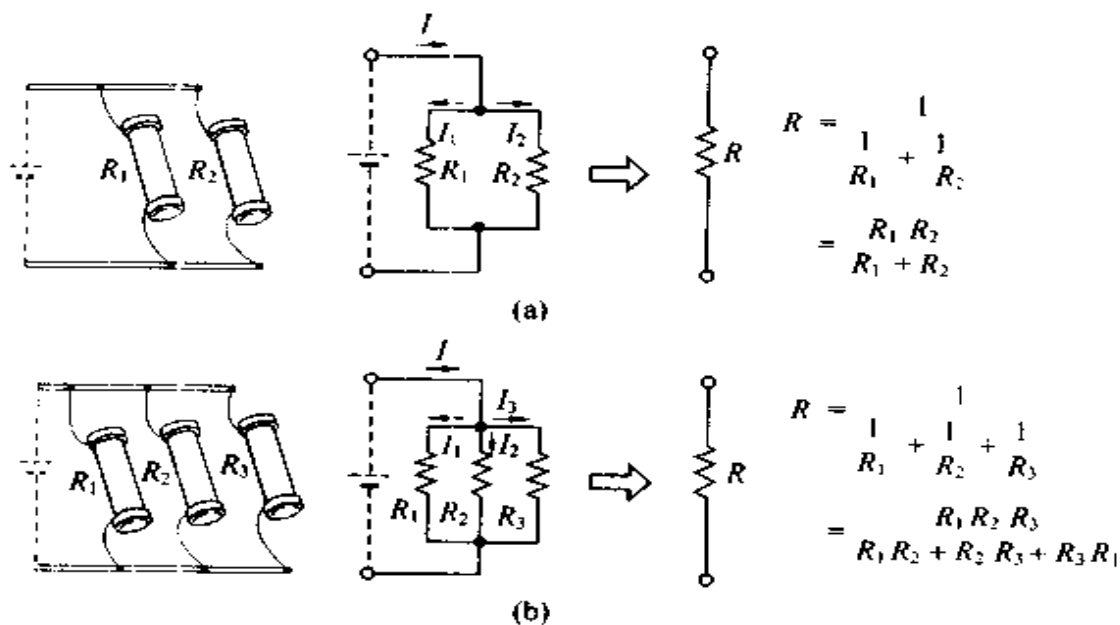


图 1.28 并联等效电阻

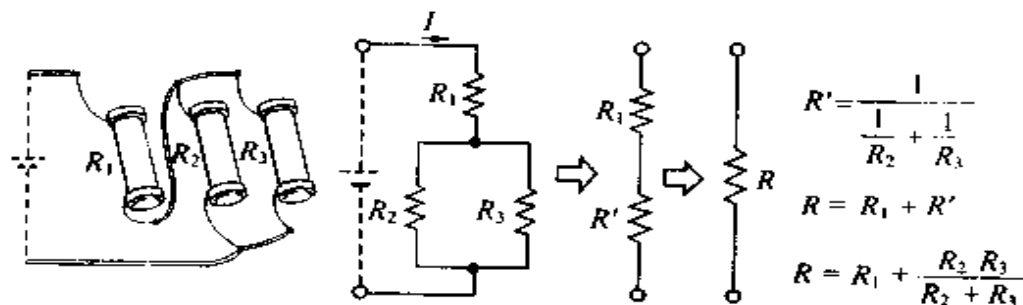


图 1.29 串并联等效电阻

构成电路的电阻有很多情况下不是一个电路只有一个电阻,而是由若干个电阻组合而构成。

下面讨论若干个电阻不同连接情况下的总电阻,(1)串联,(2)并联,(3)串并联。总电阻也称为等效电阻。

### 1.6.1 电阻串联

如图 1.27 所示,两个以上电阻形成一串的连接形式称为串联,将这样的电路称为**串联电路**。

在图 1.30 中,由于流过各电阻的电流相同,因此根据欧姆定律,各电阻的端电压  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  分别表示如下:

$$V_1 = IR_1 \quad V_2 = IR_2 \quad V_3 = IR_3$$

由于电池两端的电压等于加在各电阻上的电压之和,因此

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = I(R_1 + R_2 + R_3) = IR$$

式中,令

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad [\Omega]$$

这样,形成与欧姆定律基本形式相同的形式。对于电池来说,在电压  $V$  作用下流过一个电阻  $R$  的电流也为  $I$ ,因此如图所示,串联电阻可等效为一个电阻。该  $R$  称为等效电阻。因而,电阻串联的通式表示如下:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n \quad [\Omega]$$

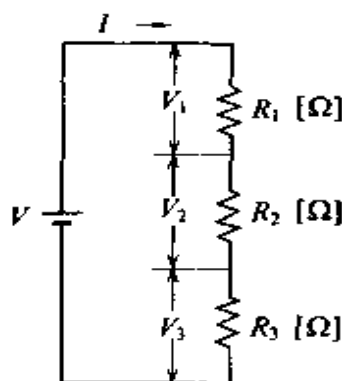


图 1.30 电阻串联

**例题** 某电路由  $3\Omega$ 、 $4\Omega$ 、 $5\Omega$  三个电阻串联而成,求该电路的等效电阻。

**解答:** 根据  $R = R_1 + R_2 + R_3$ , 等效电阻为

$$R = 3 + 4 + 5 = 12$$

→ 等效电阻为  $12\Omega$

### 1.6.2 电阻并联

图 1.28(a)及(b)所示为电阻并联的例子。将两个以上电阻

的两端分别接于同一点的形式称为电阻并联,将这样的电路称为并联电路。

下面来计算图 1.31(a) 所示的两个电阻并联的从 a 端到 b 端的等效电阻。

由于在该电路的 ab 两端之间加上电压  $V[V]$ , 因此各电阻  $R_1$  及  $R_2$  分别加上相同的电压  $V$ 。若设分别流过  $R_1$  及  $R_2$  的电流为  $I_1$  及  $I_2$ , 则根据欧姆定律,

$$I_1 = \frac{V}{R_1} \quad I_2 = \frac{V}{R_2}$$

另外, 由于流过电池的总电流  $I$  为  $I_1$  与  $I_2$  之和, 因此

$$I = I_1 + I_2 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} = V \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

式中, 若将  $V \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$  写成  $V \times \frac{1}{R}$ , 则该  $R$  表示并联电路的等效电阻[参见图 1.31(b)], 即

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R}$$

所以 
$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

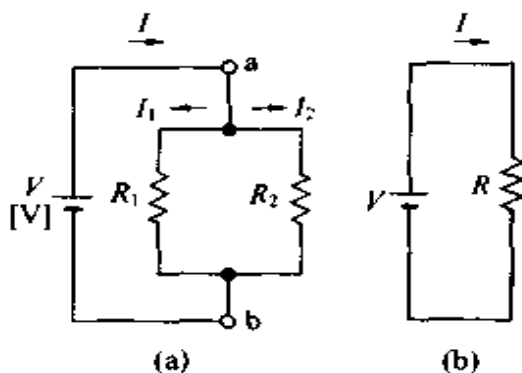


图 1.31 电阻并联电路

**例题** 有电阻  $3\Omega$  与  $2\Omega$  并联, 求其等效电阻。

**解答:** 根据  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{3} + \frac{1}{2} = \frac{2+3}{6} = \frac{5}{6}$$

所以  $R = 1.2$

→ 等效电阻为  $1.2\Omega$

注: 将电阻  $R[\Omega]$  的倒数  $(1/R)$  记作  $G$ 。  $G$  越大,  $R$  就越小, 表示电流越容易流过。将  $G$  称为电导, 单位用西门子(单位符号为 S)。

图 1.28(b) 中三个电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  [ $\Omega$ ] 并联时, 等效电阻  $R$  [ $\Omega$ ] 可采用与两个电阻并联的同样方法, 按下式求出:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1 R_2 R_3}$$

若将上式取倒数, 则

$$R = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} [\Omega]$$

同样,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\dots$ 、 $R_n$  的  $n$  个电阻并联时等效电阻  $R$  [ $\Omega$ ] 为

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

如果  $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n$  时, 则可知等效电阻为一个电阻阻值的  $1/n$ 。

### 1.6.3 串并联的等效电阻

考虑方法是首先注意电路中的并联部分, 找出解决的线索。在图 1.29 中, 根据电阻  $R_2$  及  $R_3$  的并联电路, 求出其等效电阻  $R'$ , 再接着求出  $R_1$  与  $R'$  的串联等效电阻  $R$ , 则能求出整个电路的等效电阻  $R$  [ $\Omega$ ]。

**例 题** 求图 1.32 中 ab 端子间的等效电阻。

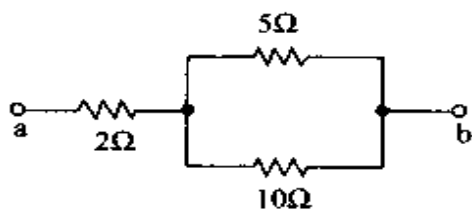


图 1.32

**解答:** 并联电阻部分的等效电阻  $R'$  为

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{5} + \frac{1}{10} = \frac{3}{10}$$

所以  $R' \approx 3.33$

由于 ab 间的等效电阻  $R$  为  $R'$  与  $2\Omega$  的串联电阻, 则

$$R \approx 2 + 3.33 = 5.33$$

→ 等效电阻  $R$  为  $5.33\Omega$

# 1.7 直流电路的计算

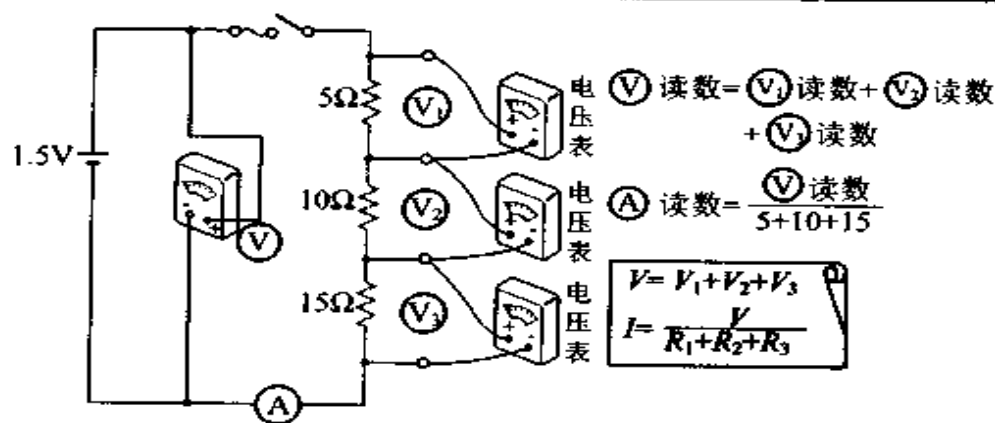


图 1.33

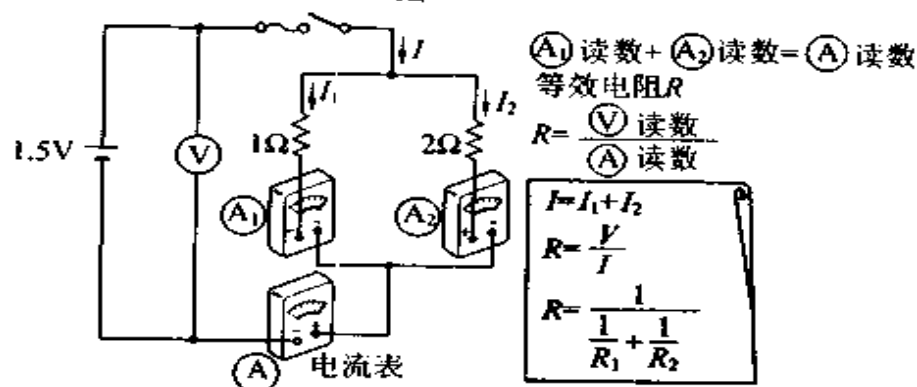


图 1.34

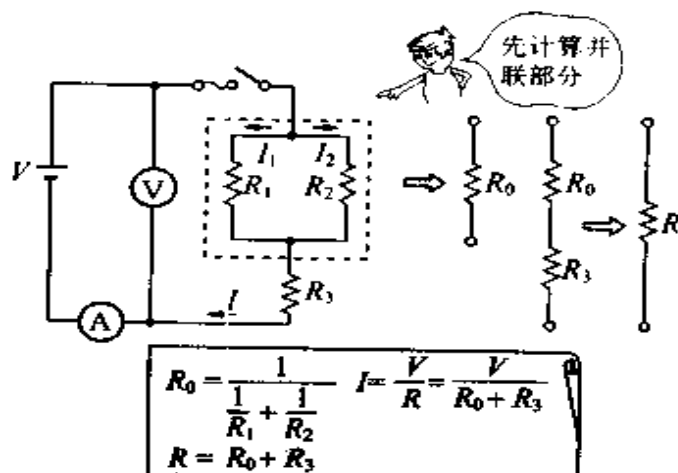


图 1.35

### 1.7.1 电阻上的电压降

在图 1.33 所示的电路中,由于电阻是串联,因此各电阻流过的电流相等,电阻两端出现的电压降为电流与电阻的乘积,如下所示。

流过电路的电流  $I[\text{A}]$  只要用等效电阻  $R[\Omega]$  除电源电压  $1.5\text{V}$  即可求出。

$$\text{等效电阻} \quad R = 5 + 10 + 15 = 30\Omega$$

$$\text{电源电压} \quad V = \text{电压表的读数} = 1.5\text{V}$$

$$\text{流过电路的电流} \quad I[\text{A}] = 1.5/30 = 0.05\text{A} (=50\text{mA})$$

加在各电阻上的端电压  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  为

$$V_1 = I \times R_1 = 0.05 \times 5 = 0.25\text{V}$$

$$V_2 = I \times R_2 = 0.05 \times 10 = 0.5\text{V}$$

$$V_3 = I \times R_3 = 0.05 \times 15 = 0.75\text{V}$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = 0.25 + 0.5 + 0.75 = 1.5\text{V}$$

图 1.36(b) 是表示以图 1.36(a) 的电路中 e 点为基准的电路各点电位的变化。即电池电压为  $1.5\text{V}$ , 由于  $5\Omega$  电阻产生的电压降为  $0.25\text{V}$ , 因此 b 点的电位为  $1.5 - 0.25 = 1.25\text{V}$ 。再由于  $10\Omega$  电阻产生的电压降为  $0.5\text{V}$ , 因此 c 点的电位为  $1.25 - 0.5 = 0.75\text{V}$ 。最后由于  $15\Omega$  电阻产生  $0.75\text{V}$  电压降, 因此 d 点的电位将变为零。

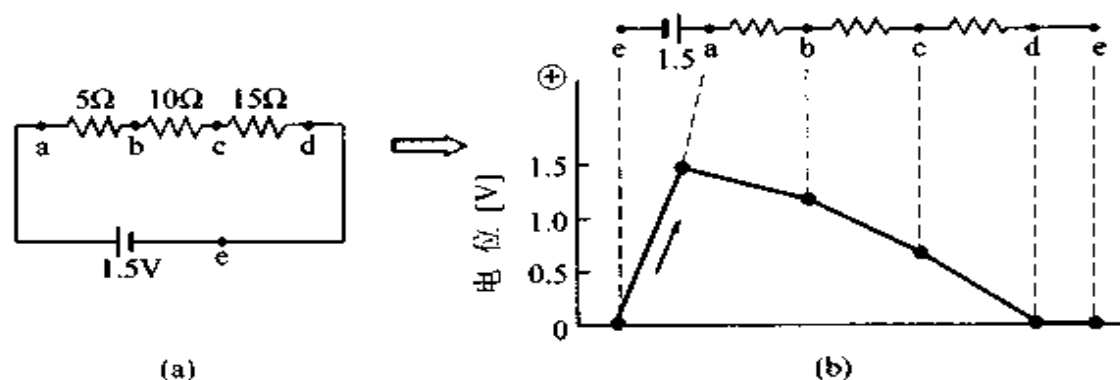


图 1.36

这样,在电阻串联的电路中,电源电压等于全部电阻电压降之和。

### 1.7.2 电阻并联电路中的电流

如图 1.34 所示,电阻  $1\Omega$  与  $2\Omega$  并联,试求流过电路各部分的电流。

电路中,除了两个并联电阻以外没有其它电阻,因此  $1.5\text{V}$  加在该两个电阻两端,所以流过  $1\Omega$  电阻的电流  $I_1$  为

$$I_1 = 1.5/1 = 1.5\text{A}$$

同样

$$I_2 = 1.5/2 = 0.75\text{A}$$

电路的总电流(合成电流) $I$  为各电流之和,因此

$$I = I_1 + I_2 = 1.5 + 0.75 = 2.25\text{A}$$

根据  $V=IR$  的欧姆定律来求电路的等效电阻  $R$ ,则

$$1.5 = 2.25 \times R$$

所以  $R = 1.5/2.25 \approx 0.66\Omega$

根据前一章的求等效电阻的方法,则

$$R = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2}} = \frac{2}{3} \approx 0.66\Omega$$

由上可知,根据欧姆定律从电压降求得的值与根据电阻计算求得的值是一样的。

### 1.7.3 电阻串并联电路的电流与电压的关系

为了求出图 1.35 所示电路中的电流  $I$ ,首先必须求出等效电阻  $R$ 。

$$R = \boxed{R_1 \text{ 与 } R_2 \text{ 并联的等效电阻 } R_0} + R_3 \quad (1)$$

$$R_0 = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),则

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 \\
 &= \frac{R_1 R_2 + R_3 (R_1 + R_2)}{R_1 + R_2} \quad [\Omega]
 \end{aligned}$$

由于电流  $I$  为等效电阻  $R$  除电源电压  $V$  [V], 因此

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{V}{R} \\
 &= V \times \frac{1}{R} = V \times \left[ \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 + R_3 (R_1 + R_2)} \right] \quad [\text{A}]
 \end{aligned}$$

$R_3$  两端的电压降  $V_{R3}$  为

$$V_{R3} = IR_3 \quad [\text{V}]$$

$R_1$  及  $R_2$  两端电压降  $V_{R1}$  及  $V_{R2}$  为

$$V_{R1} = V_{R2} = V - V_{R3} = V - IR_3$$

流过  $R_1$  及  $R_2$  的电流  $I_1$  及  $I_2$  为

$$I_1 = \frac{V - IR_3}{R_1} \quad [\text{A}]$$

$$I_2 = \frac{V - IR_3}{R_2} \quad [\text{A}]$$

**例 题** 求图 1.37 所示电路中的等效电阻、电流  $I$  及流过各电阻的电流。

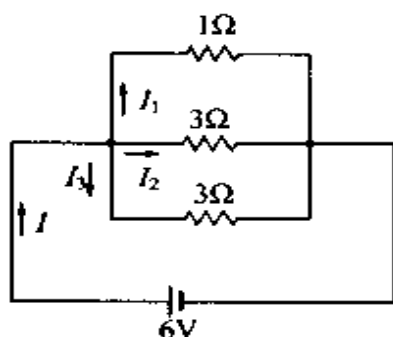


图 1.37

解答: 该电路的等效电阻  $R$  [Ω] 为

$$R = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}} = \frac{3}{5} = 0.6\Omega$$

由于电源电压为 6V, 因此根据欧姆定律  $V = IR$ , 则电流  $I$  [A] 为

$$6 = I \times 0.6$$

所以  $I = 6/0.6 = 10\text{A}$

流过各电阻的电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  为

$$I_1 = 6/1 = 6\text{A} \quad I_2 = 6/3 = 2\text{A}$$

$$I_3 = 6/3 = 2\text{A}$$



——→ 等效电阻为  $0.6\Omega$ , 电流  $I$  为  $10\text{A}$ , 流过各电阻的电流  $I_1$  为  $6\text{A}$ ,  $I_2$  为  $2\text{A}$ ,  $I_3$  为  $2\text{A}$

**例题** 在图 1.38 中, 电阻  $1\Omega$  与  $2\Omega$  串联, 再将  $3\Omega$  电阻与该串联电阻进行并联。在该电路中流过  $2\text{A}$  电流时, 求流过各电阻的电流及各电阻两端的电压。

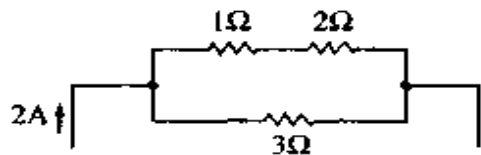


图 1.38

解答:  $1\Omega \rightarrow 1\text{A}, 1\text{V}$   $2\Omega \rightarrow 1\text{A}, 2\text{V}$   $3\Omega \rightarrow 1\text{A}, 3\text{V}$

**例题** 在图 1.39 所示的电阻串并联电路中, 求等效电阻, 并求流过各电阻的电流及各电阻两端的电压。

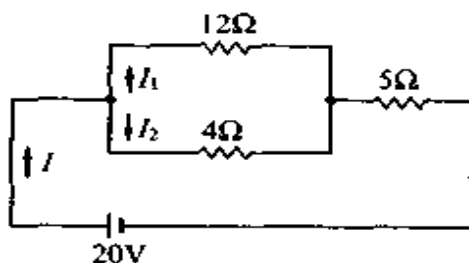


图 1.39

解答: 要求电路的等效电阻  $R[\Omega]$ , 首先必须求出  $12\Omega$  与  $4\Omega$  并联电阻的等效电阻  $R_0$ , 所以

$$R_0 = \frac{1}{\frac{1}{4} + \frac{1}{12}} = \frac{12}{4} = 3\Omega$$

$$R = R_0 + 5 = 3 + 5 = 8\Omega$$

根据欧姆定律, 电流  $I[\text{A}]$  为

$$I = \frac{V}{R} = \frac{20}{8} = 2.5\text{A}$$

电阻  $5\Omega$  两端的电压降  $V_{5\Omega}$  为

$$V_{5\Omega} = I \times 5 = 2.5 \times 5 = 12.5\text{V}$$

电阻  $12\Omega$  与  $4\Omega$  两端的电压相等, 为

$$V_{4\Omega} = V_{12\Omega} = I \times R_0 = 2.5 \times 3 = 7.5\text{V}$$

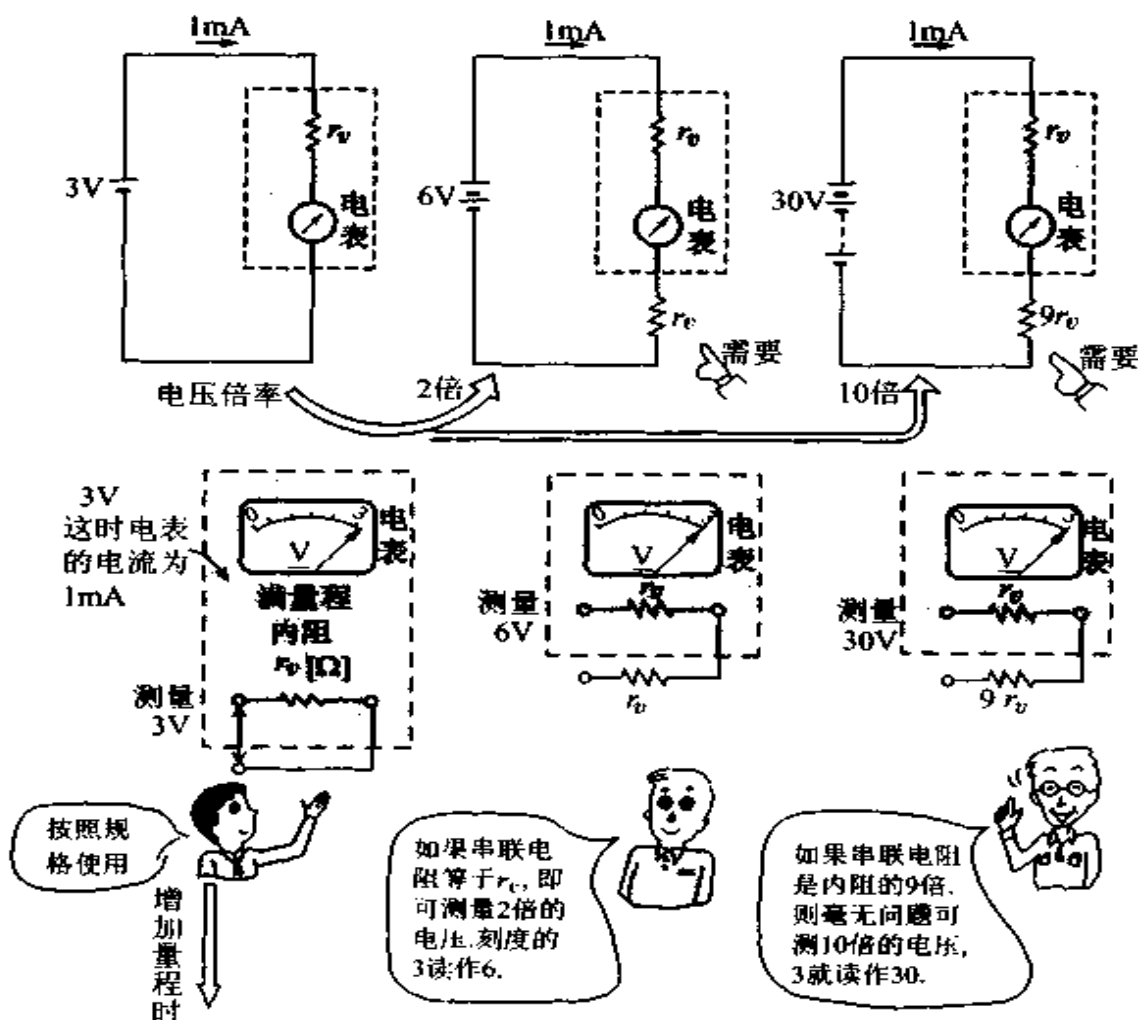
流过的电流  $I_1$  及  $I_2$  分别为

$$I_1 = 7.5/12 = 0.625\text{A} \quad I_2 = 7.5/4 = 1.875\text{A}$$

——→ 流过  $5\Omega$  的电流为  $2.5\text{A}$ , 两端电压为  $12.5\text{V}$ ; 流过  $12\Omega$  的电流为  $0.625\text{A}$ , 两端电压为  $7.5\text{V}$ ; 流过  $4\Omega$  的电流为  $1.875\text{A}$ , 两端电压为  $7.5\text{V}$ 。

# 1.8 分压与直流电压表

用3V的直流电压表如何测30V的电压？



只要串联电阻值=电压表内阻 $\times$ (测量倍率-1)即可

图 1.40

## 1.8.1 分压与直流电压表

如欧姆定律所述,流过电路的电流与电路电阻的乘积相当于产生的电压降。下面知道,分压将是电阻的一个重要作用。

如图 1.41 所示,通过改变电刷 b 在滑线电阻  $R$  上的位置,可以从电源电压  $V$  取出不同大小的电压  $V_{bc}$ 。其大小如下所示:

$$V_{bc} = Ir = \frac{V}{R} r = \frac{r}{R} V \quad [V]$$

例如,6V 的电源连接  $6\Omega$  电阻时,流过的电流为 1A。若将电阻 3 等分的点分别设为 b 及 c,则取出的电压  $V_{ad}$ 、 $V_{bd}$ 、 $V_{cd}$  如下所示(参见图 1.42):

$$V_{ad} = 1A \times 6\Omega = 6V$$

$$V_{bd} = 1A \times 4\Omega = 4V$$

$$V_{cd} = 1A \times 2\Omega = 2V$$

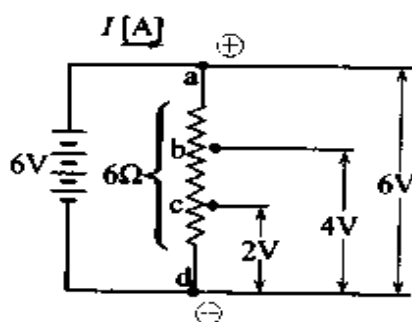


图 1.42

$$I = 1.5/50 = 30mA$$

但是,电表的允许电流若为 1mA,当然电表就要烧坏。因此必须串联电阻  $R$ ,使流过电路的电流限制在 1mA 以下。

如图 1.44 所示,为了将流过电路的电流限制在 1mA,要串联多大的  $R$  才行? 根据欧姆定律,由于条件是

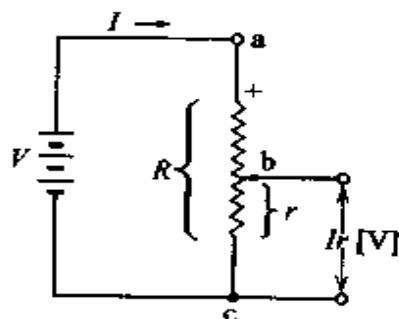


图 1.41

这一原理可用作分压器,广泛用于测量电池电压的装置即直流电位差计等仪器。

## 1.8.2 电压表与倍压器

在图 1.43 所示电路中,由于电表的内阻为  $50\Omega$ ,因此根据欧姆定律,流过的电流  $I$  为

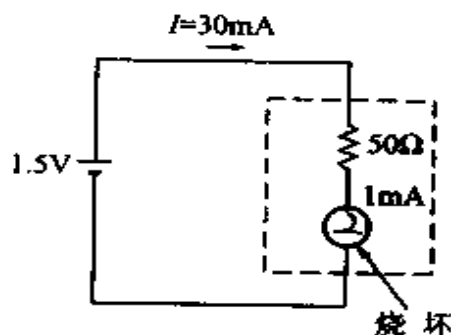


图 1.43

$I = 1\text{mA}$ , 因此

$$I = \frac{1.5}{50 + R} = 0.001\text{A}$$

$\uparrow$   
 $R'$

由于  $R' = 1500\Omega$ , 因此

$$R = 1500 - 50 = 1450\Omega$$

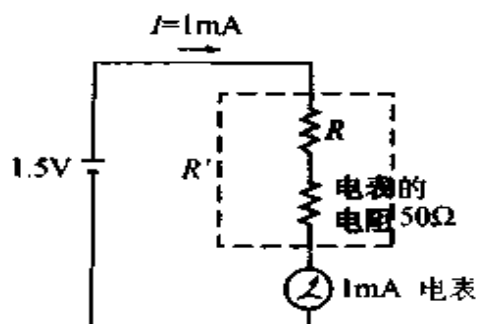


图 1.44

为了使流过电表的电流在  $1\text{mA}$  以下, 外部必须串联  $1450\Omega$  以上的电阻。

一般如图 1.45 所示, 若将电阻  $R_m [\Omega]$  与电压表  $\text{V}$  连接, 则电压表具有的内阻  $r_v [\Omega]$  与  $R_m$  串联。若对其加上电压  $V$ , 则  $V$  及  $V_v$  如下所示。

$$V_v = I \times r_v$$

$$V = I \times (r_v + R_m)$$

$$\frac{V}{V_v} = \frac{I \times (r_v + R_m)}{I \times r_v}$$

$$V = \frac{r_v + R_m}{r_v} V_v = \left(1 + \frac{R_m}{r_v}\right) V_v$$

根据上式, 如果想把电压表的刻度放大为 10 倍, 则只要使连接的  $R_m$  为电表内阻  $r_v$  的 9 倍的电阻值即可。将该电阻  $R_m$  称为倍压器。若设  $(r_v + R_m)/r_v = n$ , 则

$$V = nV_v$$

将该  $n$  称为倍压器的倍率。

图 1.46 的照片是电压表及倍压器之一例。图 (a) 为多量程的电压表。通过将电表与内装的若干个电阻加以组合, 就能够扩大量程。因而, 如果不特别注意电表的接线端而去读刻度, 则常常会导致无法挽回的失误, 因此必须要注意这一点。另外, 作为

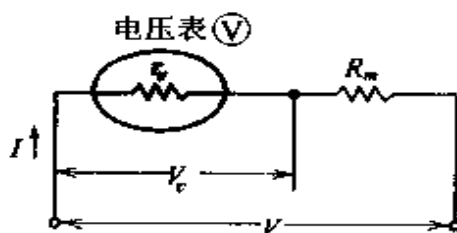


图 1.45

电路测量的一点经验,要注意一般不流过电流时,电表指针必须真正指在零。因此,要预先旋转调零螺丝进行仔细调整,这一点是非常重要的。图(b)所示为电压表内部使用的倍压器。图(c)为倍压器部分放大图。

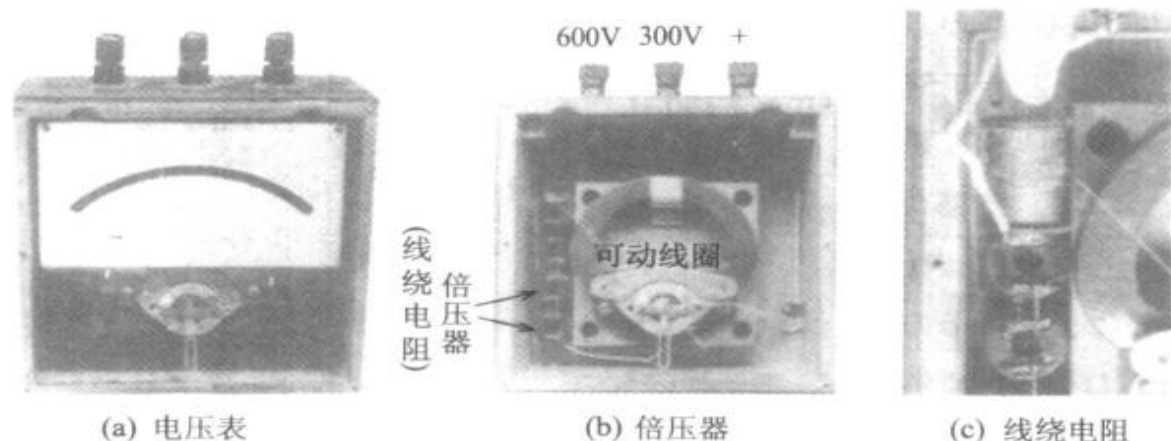


图 1.46 电压表与倍压器

**例题** 若量程 1V、内阻  $100\Omega$  的电压表(使用 1mA 的电流表)加上  $900\Omega$  的倍压器,则倍率为多少? 另外,最大能测量多大的电压?

**解答:** 倍压器的倍率  $n$  为

$$n = \frac{r_v + R_m}{r_v} = \frac{100 + 900}{100} = 10$$

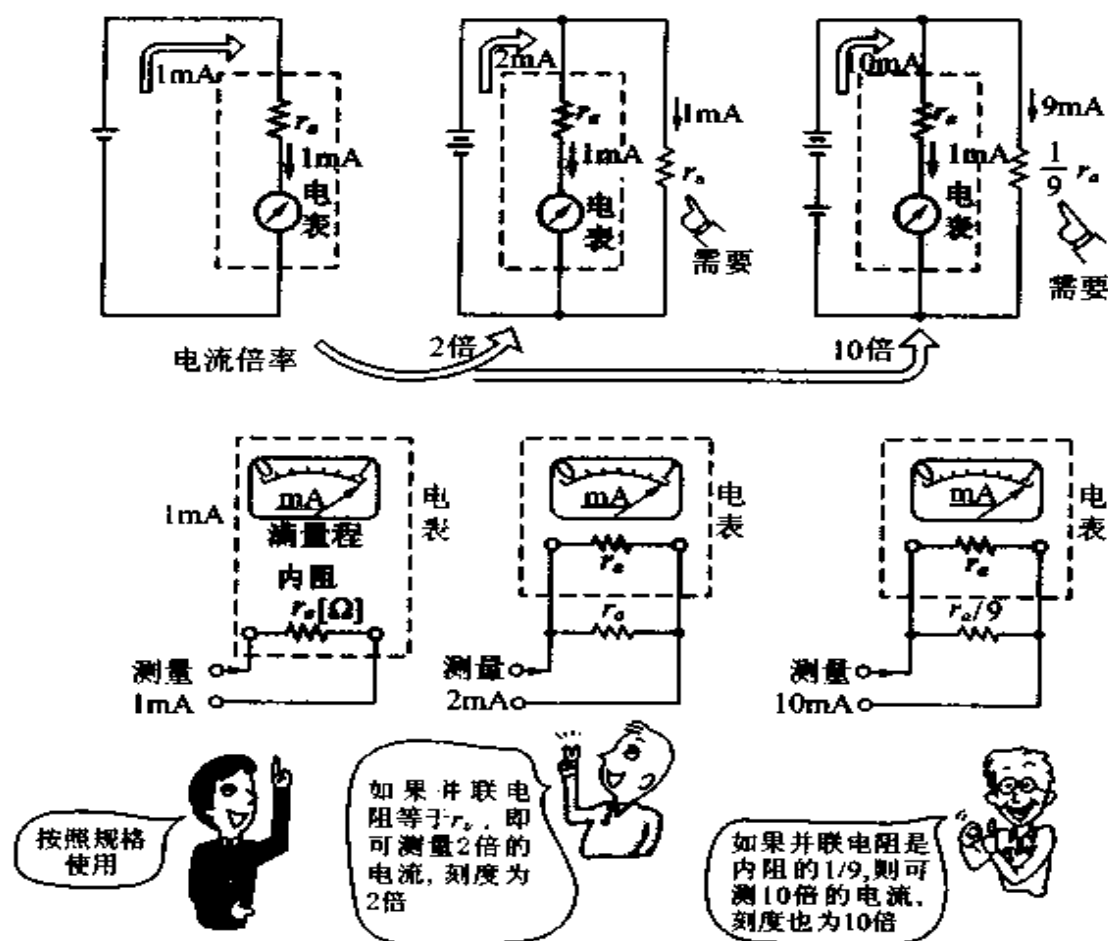
能测量的最大电压  $V[V]$  为

$$V = nV_v = 10 \times 1 = 10V$$

→ 倍率为 10 倍,能测量的电压为 10V

# 1.9 分流及直流电流表

用1mA的直流电流表如何测10mA的电流？



只要并联电阻值 = 电流表内阻 / (测量电流倍率 - 1) 即可

图 1.47

## 1.9.1 分流

前面已经叙述了电阻的并联,而流过各电阻的电流比例是多少?

在图 1.48 所示的电路中,为了用 1mA 量程的电流表测量 1A 的电流,对于电流表内阻  $r_a$  要并联外部电阻  $R$ ,而且流过  $R$  的电流必须是 999mA。因而

$$r_a \times 0.001 = 0.999 \times R$$

所以 
$$R = \frac{r_a}{999} \quad [\Omega]$$

$$\text{分流比} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{1}{0.001} = 1\,000$$

由此可知,若相对于电流表  $\textcircled{A}_2$  的内阻  $r_a$  并联电阻  $R$  为  $r_a/999$ ,则最大电流能够测量 1A。这样,根据并联电阻不同的值,用一个电流表就能够测量不同大小的电流。将这样的电阻称为分流器。

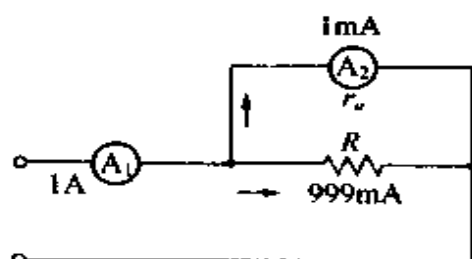


图 1.48

## 1.9.2 分流器与直流电流表

由于电流表能够测量的最大电流是一定的,因此为了测量大电流,就要采用分流器,将分流器的电阻  $R_s$  与电流表  $\textcircled{A}$  并联,将电流  $I$  分流为  $I_a$  与  $I_s$ 。

$$I = I_a + I_s \quad (1)$$

在图 1.49 中,由于端电压  $V$  一定,

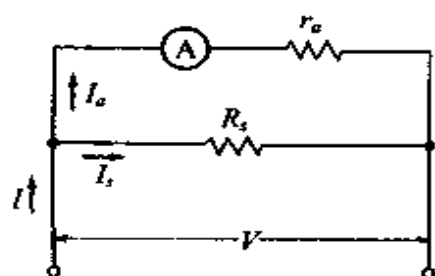


图 1.49

因此 
$$V = I_a r_a = I_s R_s$$

$$I_a = \frac{V}{r_a} \quad I_s = \frac{V}{R_s} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),则

$$I = \frac{V}{r_a} + \frac{V}{R_s}$$

计算  $I$  与  $I_a$  的比值,则

$$\frac{I}{I_a} = \left( \frac{V}{r_a} + \frac{V}{R_s} \right) / \frac{V}{r_a} = \frac{r_a + R_s}{R_s}$$

$$I = \frac{r_a + R_s}{R_s} I_a \quad (3)$$

这样,通过采用分流器  $R_s$ ,用该电流表④就能够测量  $(r_a + R_s)/R_s$  倍的电流。实际上,由于流过电流表④的电流是有限的,因此为了测量大电流,要采用电阻值比电流表内阻低的分流器。将被测电流  $I$  与电流表量程  $I_a$  之比称为分流器的倍率  $m$ 。

$$m = \frac{I}{I_a} = \frac{R_s + r_a}{R_s} = 1 + \frac{r_a}{R_s}$$

所以  $R_s = \frac{r_a}{m - 1}$

因而,若知道分流器  $R_s$  的值与电流表内阻  $r_a$ ,则能测量的最大电流为用电流表测量的电流的  $m$  倍。另外,若知道分流器的倍率,则能求出分流器电阻  $R_s$  (参见图 1.47)。

**例 2** 量程 10mA、内阻  $2.9\Omega$  的电流表装有  $0.1\Omega$  的分流器时,分流器的倍率为多少? 另外,能测量的最大电流为多少?

**解答:** 分流器的倍率  $m$  为

$$m = \frac{R_s + r_a}{R_s} = 1 + \frac{r_a}{R_s} = 1 + \frac{2.9}{0.1} = 30$$

由于电流表的量程为 10mA,根据  $m = I/I_a$ ,能测量的最大电流为

$$30 = \frac{I}{10 \times 10^{-3}}$$

所以  $I = 30 \times 10 \times 10^{-3} = 300\text{mA}$

→ 倍率为 30 倍,最大电流为 300mA

**例 3** 有一个直流电流表,其能测量的最大电流为 2A,电阻为  $1.4\Omega$ 。为了用该电流表测量最大 30A 的电流,要采用多大电阻的分流器?

**解答:** 分流器的倍率  $m$  为



$$m = \frac{I}{I_g} = \frac{30}{2} = 15$$

分流器的电阻与电流表内阻的关系为  $m = 1 + (r_g/R_s)$ , 因此

$$15 = 1 + \frac{1.4}{R_s}$$

所以  $R_s = \frac{1.4}{15 - 1} = 0.1\Omega$

—— 倍率为 15 倍, 电阻为  $0.1\Omega$

**问 题** 图 1.50 为采用分流器的电流测量电路。回答下列问题:

(1) 电流  $I$  为 30mA 时, 流过电流表的电流为 3mA, 求分流器  $r$ 。

(2) 求 (1) 的情况下的倍率。

(3) 用  $r = 1.25\Omega$  的分流器时, 电流表的读数为 2mA, 求这时的电路电流  $I$ 。

**解答:** (1)  $\rightarrow 1.39\Omega$ , (2)  $\rightarrow 10$  倍, (3)  $\rightarrow 22\text{mA}$

图 1.51 为直流电流表及分流器之一例。图(a)为多量程便携式电流表, 内装若干个电阻以扩大量程, 使用时必须注意看电表的接线端。图(b)所示为电流表内部使用的分流器。

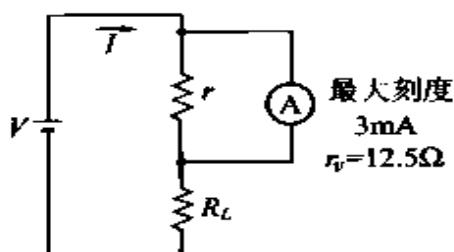


图 1.50

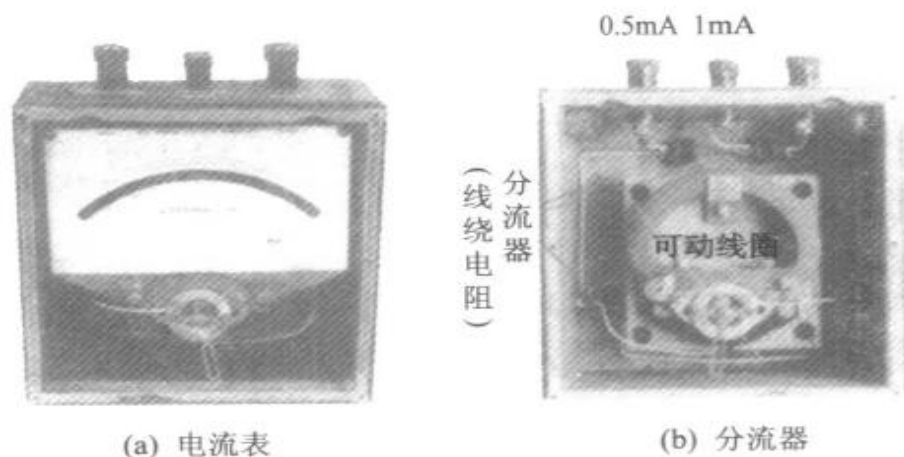


图 1.51 电流表与分流器

# 1.10 电路的特殊解法

## 对电阻进行精密测量

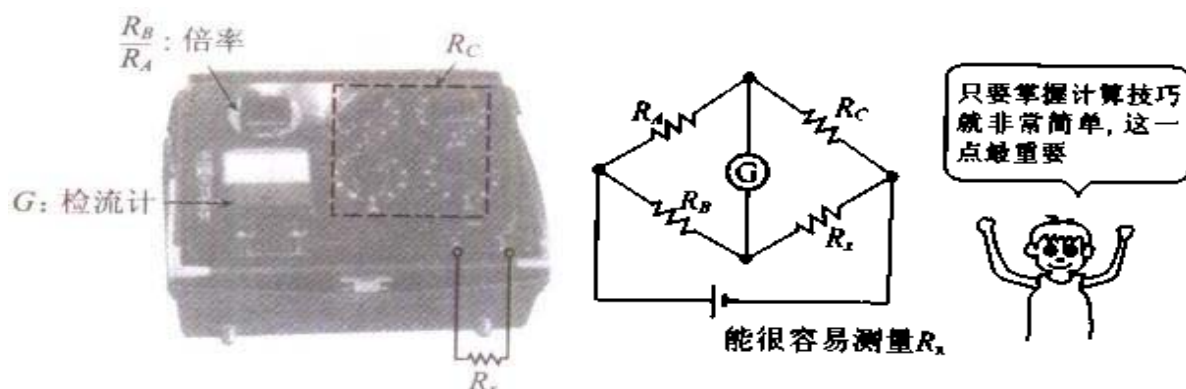


图 1.52 惠斯通电桥及其电路

## 仅仅采用欧姆定律很难进行电路计算时怎么办才好?

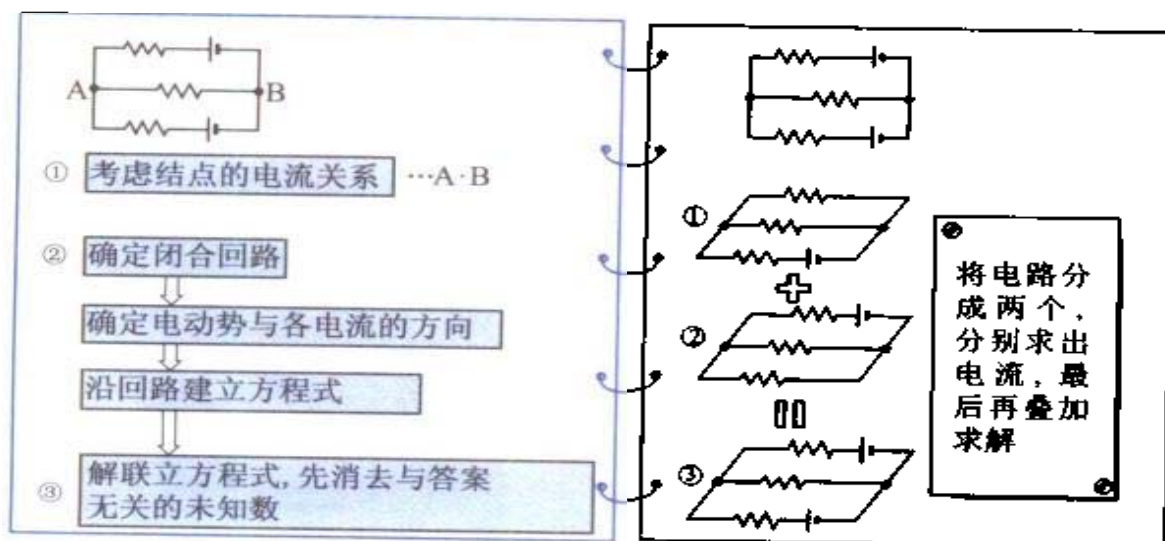


图 1.53

虽然利用已经学过的欧姆定律,足以能够进行电路计算,但对于电路中接入几个电源,或者用电阻串并联不能解决的复杂电路,可以采用下面的解法。以后的这些解法,只要掌握技巧,是非常方便的,因此一定要自己反复进行计算,这是增强本身实力的捷径。

### 1.10.1 利用电桥测量电阻

在图 1.54 所示的电路中,为了使流过检流计 G 的电流为零, a 点与 b 点的电位差必须为零。因而,若设流过电路的电流为  $I_1$  及  $I_2$ , 则  $R_A$  的电压降  $V_a$  与  $R_B$  的电压降  $V_b$  必须相等。

$$I_1 R_A = I_2 R_B \quad (1)$$

由于  $I_g = 0$ , 因此

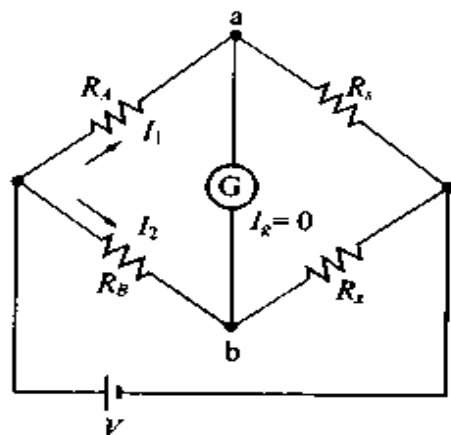


图 1.54 电桥电路

$$I_1 R_C = I_2 R_x \quad (2)$$

取式(1)与式(2)之比,则

$$\frac{I_1 R_A}{I_1 R_C} = \frac{I_2 R_B}{I_2 R_x}$$

因此,

$$\frac{R_A}{R_C} = \frac{R_B}{R_x}$$

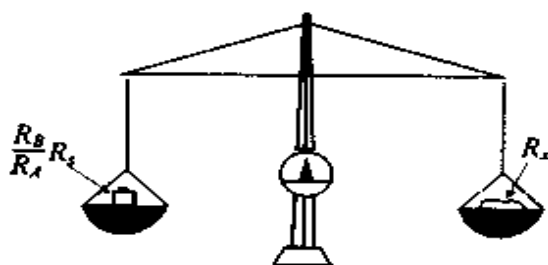


图 1.55 天平

所以 
$$R_x = \frac{R_B}{R_A} \times R_C \quad (3)$$

这样,若知道  $R_B/R_A$  与  $R_C$  的电阻值,就能够求出  $R_x$  的值。一般,将  $R_A$  与  $R_B$  称为比率臂,将  $R_C$  称为比较臂。检流计不流过电流的状态称为电路平衡,就像天平一样。利用该原理的测量仪器称为惠斯登电桥,若提高检流计的灵敏度,就能够进行更高精度的电阻测量。

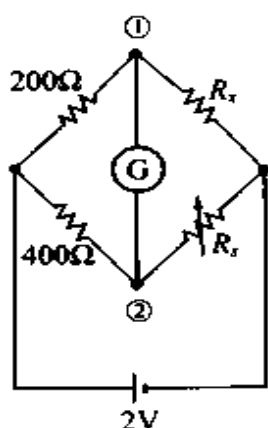


图 1.56

**例题**

在图 1.56 中,若改变电阻  $R_s$ ,则  $R_x$  为某一数值时,检流计 G 中没有电流流过。回答下列问题:

- (1)  $R_s$  为  $100\Omega$  时电桥平衡,求  $R_x$ 。
- (2) 这时的①点与②点的电位分别为多少?

**解答:**

(1) 根据电桥平衡条件,即  $R_B/R_A = R_x/R_s$ ,

$$\frac{200}{400} = \frac{R_x}{100}$$

所以  $R_x = \frac{200}{400} \times 100 = 50\Omega$

(2) 由于检流计中没有电流流过,则将电路改画成图 1.57 所示电路,来计算①点与②点的电位。流过电路的电流  $I_1$  与  $I_2$  为

$$I_1 = \frac{2}{200 + 50} = 0.008\text{A}$$

所以  $V_1 = 2 - (200 \times 0.008) = 0.4\text{V}$

$$I_2 = \frac{2}{400 + 100} = 0.004\text{A}$$

所以  $V_2 = 2 - (400 \times 0.004) = 0.4\text{V}$

—— (1)  $R_s$  为  $50\Omega$ , (2) ①点为  $0.4\text{V}$ ,  
②点为  $0.4\text{V}$

### 1.10.2 基尔霍夫定律

如图 1.53 所示,对于在电路中接入几个电源,或不平衡的电桥电路,仅仅用欧姆定律有时无无论如何也不能算出电路中的电流或电压。解决该问题的一个方法是基尔霍夫定律。

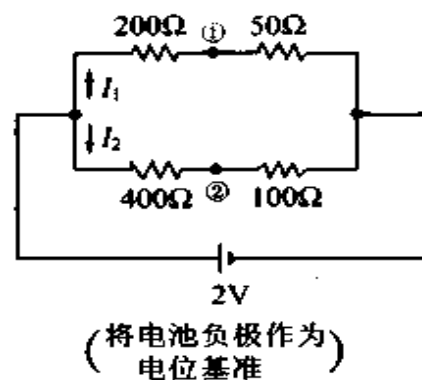


图 1.57

1. 设流入电路网络结点的电流符号为正,流出的电流符号为负,则其代数和为零。(根据基尔霍夫第一定律)

设流入图 1.58 的结点 A 的电流为  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ ,则

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

为了使上式始终成立,全部电流不能都为正。其中一个或者两个电流必须为负。因而,如果设  $I_1$  与  $I_2$  这两个电流流入 A 点,则另外的电流  $I_3 = -(I_1 + I_2)$  为负。所以,实际上沿着与图所示的相反方向流动。

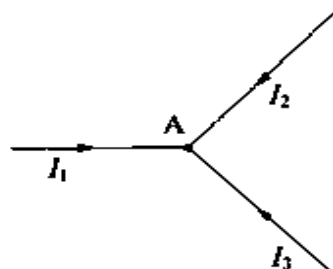


图 1.58

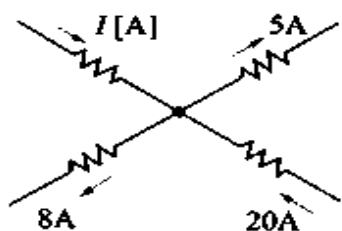


图 1.59

**例题** 在图 1.59 中,求电流  $I$  的大小。

**解答:** 根据基尔霍夫第一定律,由于流入结点的电流为  $I[A]$  与  $20A$ ,流出电流为  $8A$  与  $5A$ ,因此

$$I + 20 - 5 - 8 = 0$$

→  $I$  为  $7A$ , 是流出结点方向

2. 在电路网络中的一个闭合回路内,规定回路方向,设与回路方向一致为正,与回路方向相反为负,则回路内电动势之和与电压降之和相等。(根据基尔霍夫第二定律)

在图 1.60 中有三个闭合回路。回路中的参考循行方向设为顺时针,反方向则取负。

对于回路 I

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1$$

对于回路 II

$$-I_3 R_3 - I_2 R_2 = -E_2$$

对于回路 III

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 - E_2$$

闭合回路虽然有三个,但只要考虑到两个闭合回路中已经包含了  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ,因此作为第二定律只要取两个回路即可。

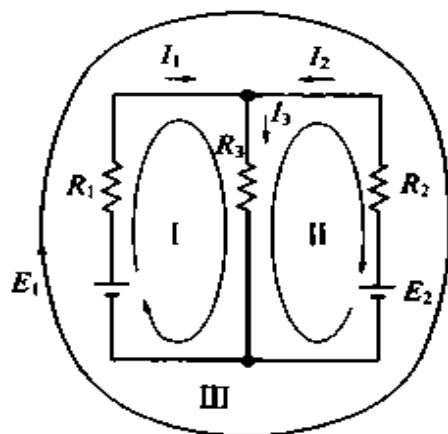


图 1.60

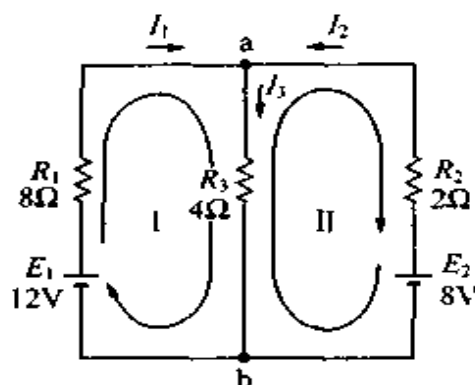


图 1.61

**例题** 求流过图 1.61 各支路的电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 。

**解答：** 根据基尔霍夫第一定律

$$\text{a 点 } I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

根据基尔霍夫第二定律

$$8I_1 + 4I_3 = 12$$

$$-4I_3 - 2I_2 = -8$$

若根据上式求  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ ，则利用  $I_1 +$

$I_2 = I_3$ ，得

$$\begin{cases} 8I_1 + 4(I_1 + I_2) = 12 & \Leftrightarrow 12I_1 + 4I_2 = 12 \\ -4(I_1 + I_2) - 2I_2 = -8 & \Leftrightarrow -4I_1 - 6I_2 = -8 \end{cases}$$

解联立方程式，则

$$I_2 = \frac{6}{7} \text{ A} \quad I_1 = \frac{5}{7} \text{ A} \quad I_1 + I_2 = I_3 = \frac{11}{7} \text{ A}$$

• 利用行列式求解联立方程式

求解联立方程式的典型方法是利用行列式。若知道一定的规则，即使复杂的方程式也能够很容易求解，是非常方便的。

设解下列联立方程式：

$$\begin{cases} a_1x + b_1y = c_1 \\ a_2x + b_2y = c_2 \end{cases}$$

(1) 将  $x$  项及  $y$  项对准排齐。

(2) 将  $x$  及  $y$  的系数按原有位置排齐。

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = a_1b_2 - a_2b_1$$

将这称为行列式，其解法是对角线相乘。即得到  $a_1b_2$  及  $a_2b_1$ ，然后右下方对角线的  $a_1b_2$  取正，右上方对角线的  $a_2b_1$  取负，再求其代数和。

联立方程式的解法是，将上式作为分母，再用  $c_1$  及  $c_2$  置换要求解的  $x$  项或  $y$  项的系数，构成行列式，将其作为分子，通过计算分别求出各项的值。因此，上式的解如下所示：

$$x = \frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}} = \frac{c_1b_2 - c_2b_1}{a_1b_2 - a_2b_1}$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}} = \frac{a_1 c_2 - a_2 c_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}$$

**例题** 求流过图 1.61 各支路的电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 。

解答：利用基尔霍夫定律，求出下列方程式：

$$\begin{cases} 12I_1 + 4I_2 = 12 \\ -4I_1 - 6I_2 = -8 \end{cases}$$

利用行列式求解  $I_1$  及  $I_2$

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} 12 & 4 \\ -8 & -6 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 12 & 4 \\ -4 & -6 \end{vmatrix}} = \frac{12 \times (-6) - 4 \times (-8)}{12 \times (-6) - (-4) \times 4} = \frac{-72 + 32}{-72 + 16} = \frac{5}{7} \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} 12 & 12 \\ -4 & -8 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 12 & 4 \\ -4 & -6 \end{vmatrix}} = \frac{12 \times (-8) - (-4) \times 12}{12 \times (-6) - (-4) \times 4} = \frac{-96 + 48}{-56} = \frac{6}{7} \text{ A}$$

$$I_3 = I_1 + I_2 = \frac{5}{7} + \frac{6}{7} = \frac{11}{7} \text{ A}$$

### 1.10.3 叠加原理

若在一个电路网络中包含两个以上的电动势，为了求出流过电路网络各支路的电流，可以求出各电动势单独存在时流过各支路的电流，再将它们合成起来求出的电流即为原来电路要求的电流。这称为叠加原理。利用这个原理，即使复杂的电路也能够作为简单的电阻串并联电路进行计算，因此容易求解。

由图 1.62 可知，是将电源只剩下一个，其它的拿掉，将拿掉电源的地方短路，然后求各支路的电流。依次反复进行上述的操作，最后还要考虑方向，求同一支路中的电流之和，即：

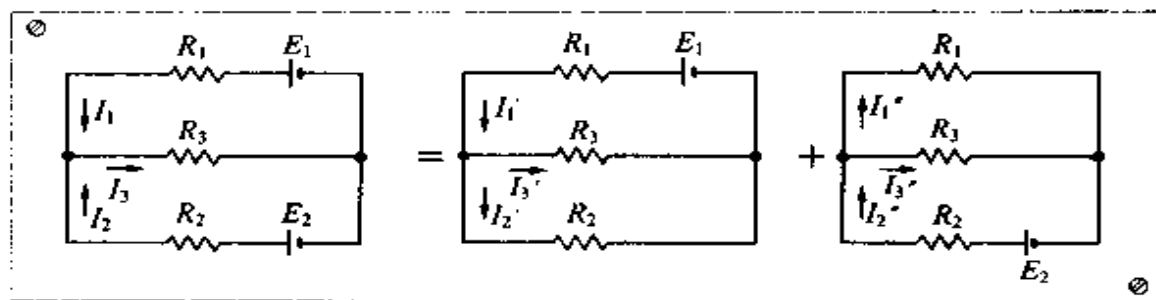


图 1.62 叠加原理

$$I_1' = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{E_1 (R_2 + R_3)}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}$$

( $R_2$ 、 $R_3$  的并联等效电阻)

$$I_2' = I_1' \frac{R_3}{R_2 + R_3} \quad I_3' = I_1' \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

$$I_2'' = \frac{E_2}{R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}} = \frac{E_2 (R_1 + R_3)}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}$$

( $R_1$ 、 $R_3$  的并联等效电阻)

$$I_1'' = I_2'' \frac{R_3}{R_1 + R_3} \quad I_3'' = I_2'' \frac{R_1}{R_1 + R_3}$$

若各支路电流与原始电路中的方向相同,则取正;若相反,则取负。

$$I_1 = I_1' - I_1'' = \frac{E_1 (R_2 + R_3)}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} - \frac{E_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}$$

$$I_2 = -I_2' + I_2'' = -I_1' \frac{R_3}{R_2 + R_3} + \frac{E_2 (R_1 + R_3)}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}$$

$$I_3 = I_3' + I_3'' = I_1' \frac{R_2}{R_2 + R_3} + I_2'' \frac{R_1}{R_1 + R_3}$$



**例 题** 利用叠加原理,求图 1.63 电路的各支路电流。

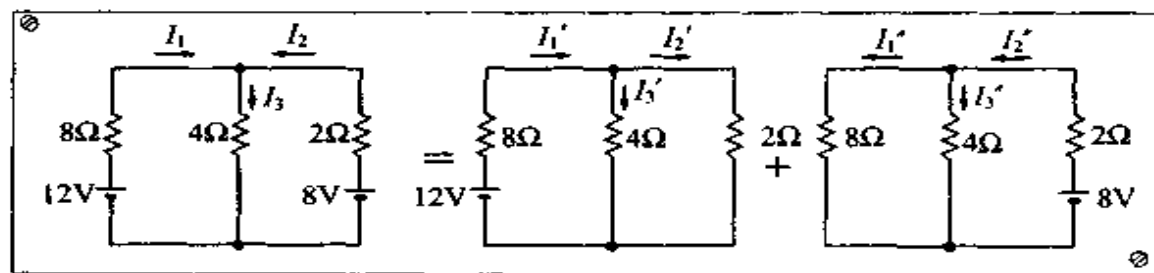


图 1.63

解答:

$$I_1' = \frac{12}{8 + \frac{8}{4+2}} = \frac{9}{7}$$

$$I_2' = \frac{9}{7} \times \frac{4}{4+2} = \frac{6}{7}$$

$$I_3' = \frac{9}{7} \times \frac{2}{4+2} = \frac{3}{7}$$

$$I_2'' = \frac{8}{2 + \frac{32}{8+4}} = \frac{12}{7}$$

$$I_1'' = \frac{12}{7} \times \frac{4}{4+8} = \frac{4}{7}$$

$$I_3'' = \frac{12}{7} \times \frac{8}{4+8} = \frac{8}{7}$$

$$I_1 = I_1' - I_1'' = \frac{9}{7} - \frac{4}{7} = \frac{5}{7} \text{ A}$$

$$I_2 = -I_2' + I_2'' = -\frac{6}{7} + \frac{12}{7} = \frac{6}{7} \text{ A}$$

$$I_3 = I_3' + I_3'' = \frac{3}{7} + \frac{8}{7} = \frac{11}{7} = 1 \frac{4}{7} \text{ A}$$

$I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  的解与用基尔霍夫定律求解的结果相同。

上面说明了利用基尔霍夫定律、叠加原理及行列式求解电路电流的方法,读者可以比较一下,哪一种方法最容易使用?

# 1.11 功率

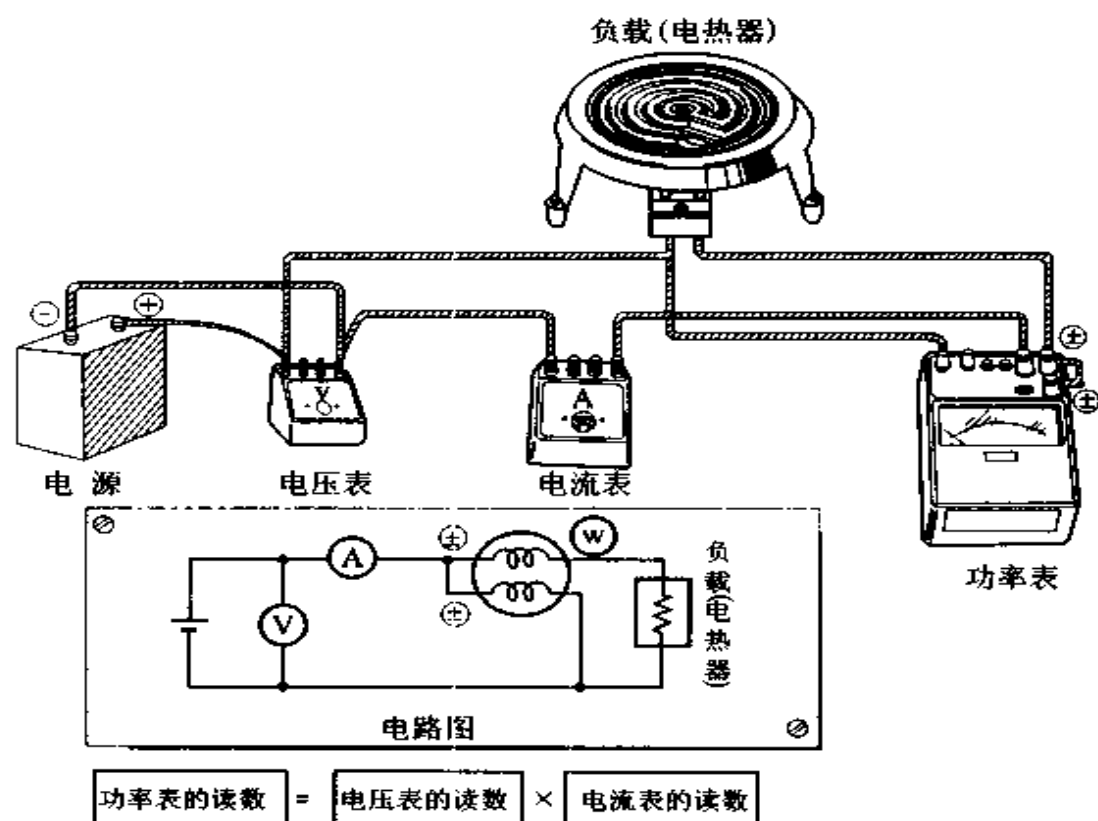


图 1.64 功率测量实验

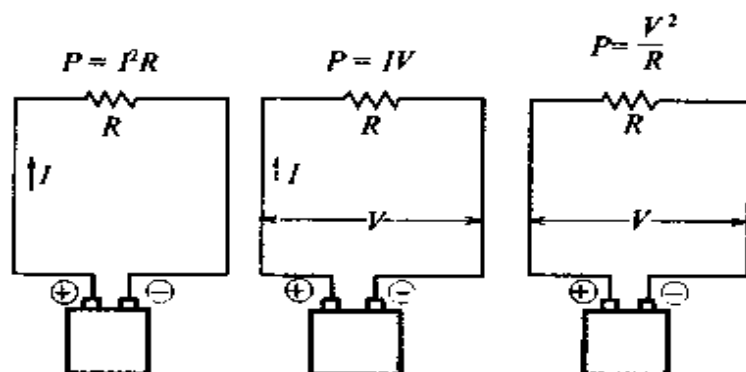


图 1.65 直流功率的计算方法

通过电的作用可产生热,电热器就是利用它所产生的热量。另外,还有像灯泡那样,利用发热而变成光。将这样用电来作功的能力称为电功率(简称功率)。下面将研究功率的性质。

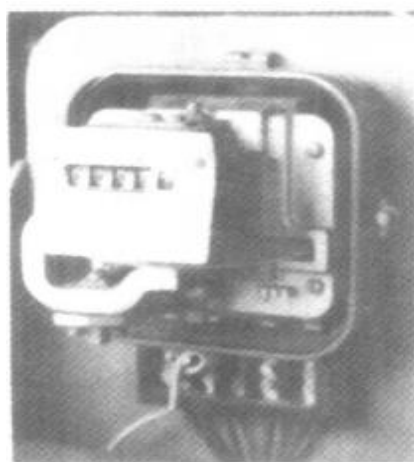


图 1.66 电度表

### 1.11.1 电产生热

若对电热器加上电压,流过电流,则产生热。这是因为,电热器的电热丝有电流流过,会产生热。电热丝是电阻较大、耐高温(熔点在  $1100^{\circ}\text{C}$  以上)的材料,采用镍铬合金丝。

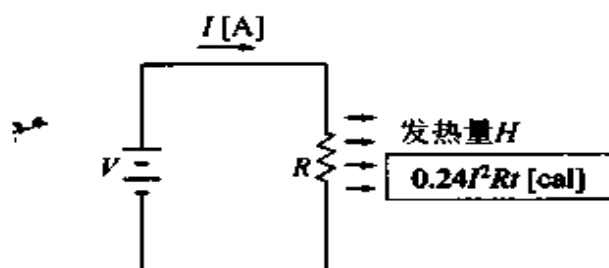


图 1.67 电热器的发热量

如图 1.67 所示,若研究与流过电阻的电流所产生的热量的关系,则下式成立。

电流  $I[\text{A}]$  流过电阻  $R[\Omega]$  的导体  $t$  秒钟所产生的热量  $H[\text{J}]$  为

$$H = I^2 R t \quad [\text{J}]$$

将这称为焦耳定律,所产生的热称为焦耳热。焦耳是功的单位,

用单位符号 J 表示。

由于普通热量也有用卡路里(单位符号为 cal)表示的,因此若将焦耳换算为卡路里的单位,则如下所示:

$$1\text{J} = 0.24\text{cal}$$

因而产生的热量  $H[\text{cal}]$  为

$$H = 0.24 I^2 R t \quad [\text{cal}]$$

对于大量的热量,则采用 1cal 的 1000 倍的 1kcal(千卡)为单位。

**例 23** 用焦耳及千卡为单位表示 2A 的电流流过  $10\Omega$  的电阻 5min 产生的热量。

**解答:** 根据  $H = I^2 R t$  [J] (注意  $t$  用秒表示)

$$H = 2^2 \times 10 \times 5 \times 60 = 4 \times 3\,000 = 12\,000\text{J}$$

若将热量换算为卡路里, 则

$$H = 0.24 \times 12\,000 = 2\,880 = 2.88\text{kcal}$$

—— 热量为 12000J, 2.88kcal

关于电线的允许电流<sup>1)</sup>, 如前所述, 电流一流过, 则由于导线电阻就要产生焦耳热, 若流过过大电流, 则导线烧断, 或产生过大的电压降, 因此必须要充分注意。例如 1.6mm 的导线(单线), 其允许电流为 27A。

### 1.11.2 功率用电流与电压的乘积表示

图 1.68 所示为利用水做功与电功率的关系。

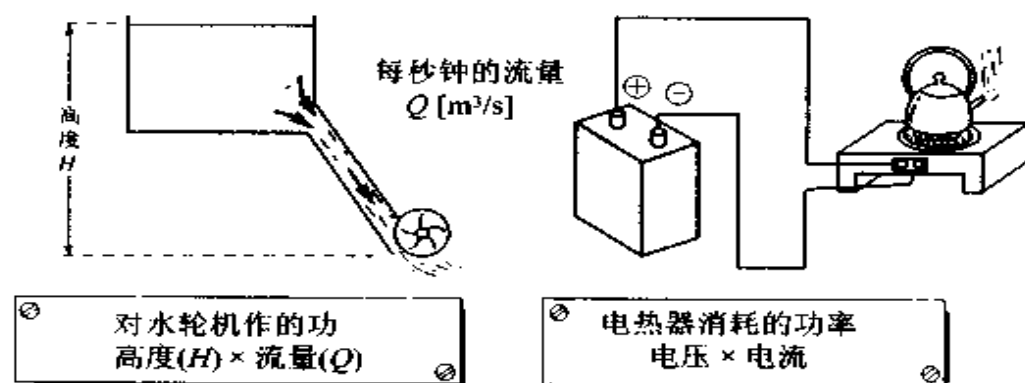


图 1.68 利用水做功与利用电做功的比较

如前所述, 单位时间(1 秒钟)所产生的热量  $H$  [J] 为

$$H = I^2 R$$
 [J] ( $t = 1$  秒)

另外, 根据已经学习的欧姆定律, 电流与电阻的乘积用电压表示, 因此上式可改写为

1) 能够安全流过的电流。

$$H = I \times IR = IV \quad (\text{式中}, IR = V)$$

这样,将单位时间消耗在电路中的电能称为功率。单位为瓦特(单位符号为 W)。1W 是 1s 作 1J 的功[J/s]。因而,功率  $P[\text{W}]$  为

$$P = I^2 R = IV = \left(\frac{V}{R}\right)^2 R = \frac{V^2}{R} \quad [\text{W}]$$

在计算大功率时,用 1W 的 1000 倍即 1kW(千瓦)作为单位表示。

### 1.11.3 电能的表示方法

$t$  秒钟内电所作的功为  $VIt[\text{J}]$ 。若用功率  $P[\text{W}]$  来表示,则为  $Pt[\text{J}]$  或  $Pt[\text{W} \cdot \text{s}]$ 。该功率  $P[\text{W}]$  与时间  $t[\text{s}]$  的乘积称为电能。单位以瓦秒[ $\text{W} \cdot \text{s}$ ]或瓦时[ $\text{W} \cdot \text{h}$ ]表示:

$$\text{电能} = \text{功率} \times \text{时间} \Rightarrow H[\text{W} \cdot \text{h}] = P[\text{W}] \times t[\text{h}]$$

$$H[\text{kW} \cdot \text{h}] = P[\text{kW}] \times t[\text{h}]$$

#### • 电能与热量的关系

$$\text{热量 } H[\text{cal}] \quad H = 0.24I^2 R t = 0.24Pt[\text{cal}]$$

$$1\text{kW} \cdot \text{h} \text{ 的电能 } 1\text{kW} \cdot \text{h} = 1000\text{W} \times 3600\text{s} = 3600 \times 10^3 \text{J}$$

$$(1\text{h} = 60 \times 60\text{s} = 3600\text{s})$$

$$1\text{kW} \cdot \text{h} = 0.24 \times 3600 \times 10^3$$

$$\approx 860 \times 10^3 \text{cal} = 860\text{kcal}$$

图 1.66 所示为电度表。图 1.64 的功率表接法中,由于该仪表原来就是测量电压及电流再用其积来表示功率的,因此使用时必须要想到电流端是串联,电压端是并联。

**例 题** 将额定电压 100V、1kW 电热器的电热丝去掉一半,问形成几瓦的电热器?

解答:根据  $P = V^2/R$ ,电热丝的电阻  $R$  为

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{100^2}{10^3} = 10\Omega$$

由于电阻与长度成正比,因此若去掉一半,则  $R' = R/2 = 10/2 = 5\Omega$ 。设这时的功率为  $P'$ ,则

$$P' = \frac{V^2}{R'} = \frac{100^2}{5} = 2\,000\text{W}$$

可知,若电阻为一半,则功率为 2 倍。

——→ 2000W(2kW)(译注:此时电热丝的功率超过额定值,是不允许的。)

**问 题** 有 100V、600W 的电热器,回答下列问题:

- (1) 流过该电热器的电流为多少?
- (2) 该电热器的电阻为多少?
- (3) 该电热器 1 分钟产生的热量为多少?

**解答:**(1)→6A,(2)→16.7Ω,(3)→8.64kcal

# 1.12 电 解

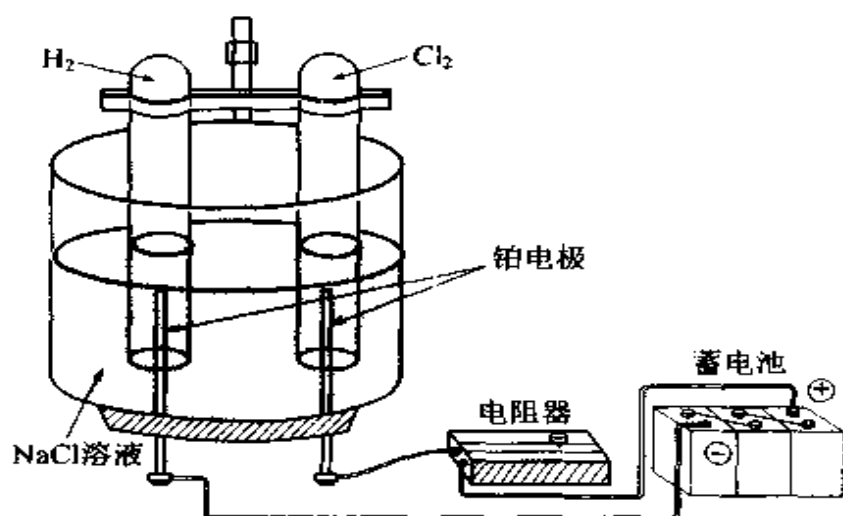


图 1.69 电解实验

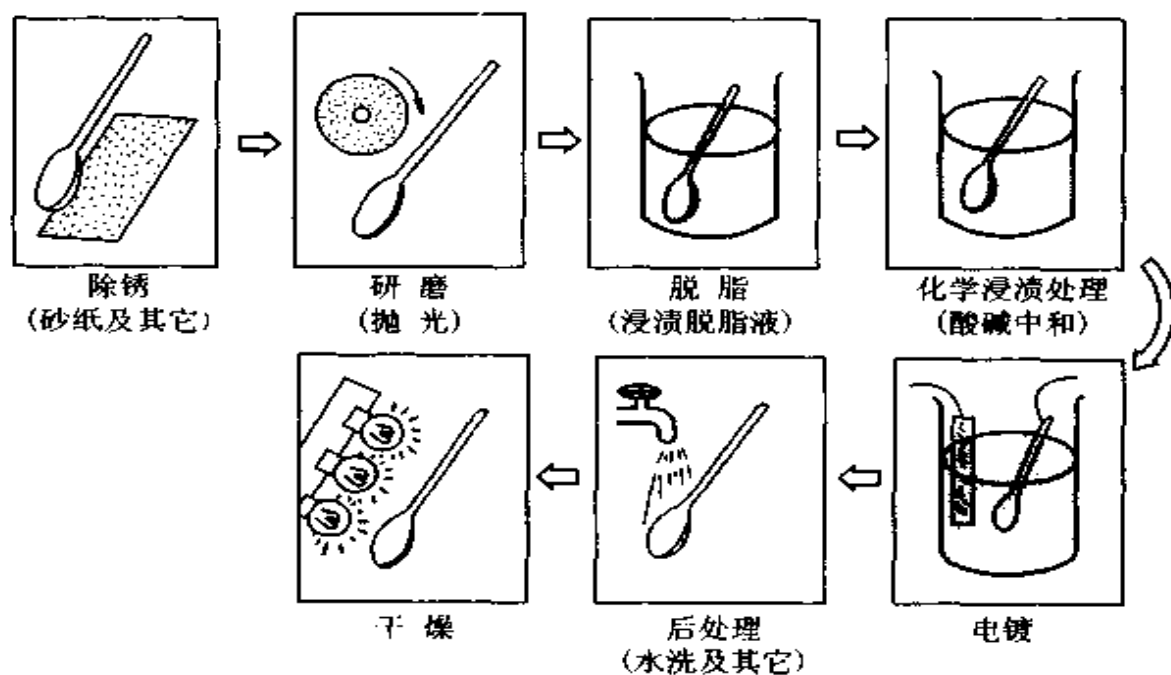


图 1.70 电镀工序(电镀汤匙)

## 1.12.1 液体中电流能通过吗？

可以认为液体也与金属那样能导电吗？若进行图 1.71 所示的实验可知，液体中有能通电的，也有不能通电的。

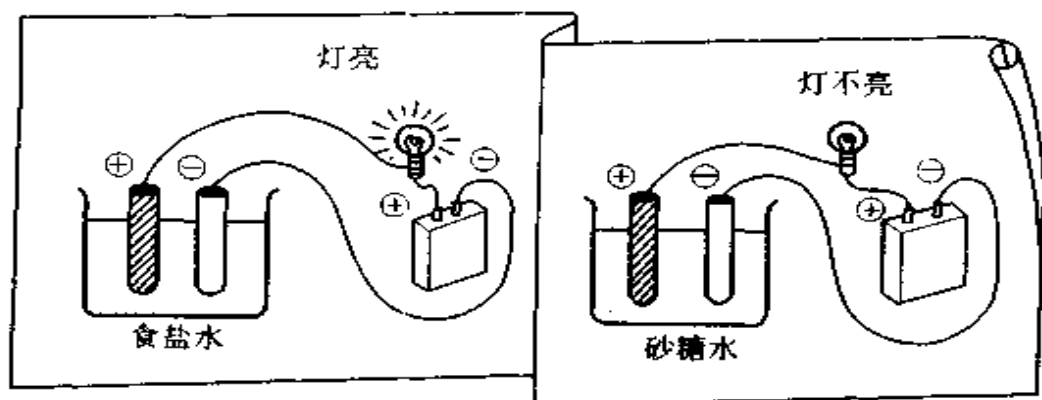


图 1.71

食盐水能导电，而砂糖水不导电，这是为什么呢？食盐是氯（化学符号为  $\text{Cl}$ ）与钠（化学符号为  $\text{Na}$ ）化合而成的。如前所述，电的本质是，原子往往失去电子而成阳离子，或者附加电子而成阴离子。若将食盐溶于水中，则分解为钠的阳离子（ $\text{Na}^+$ ）及氯的阴离子（ $\text{Cl}^-$ ），而存在于水中。这样的液体称为**电解液**。

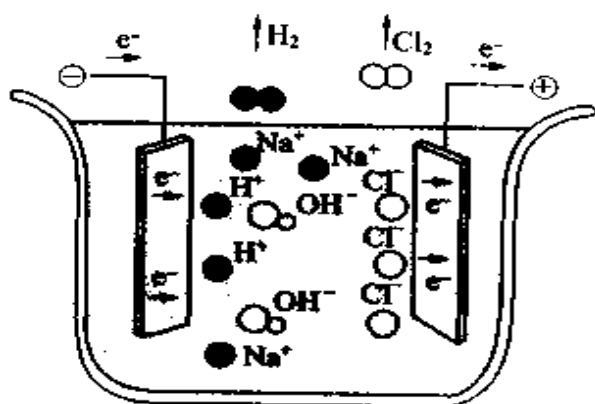
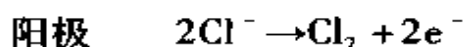


图 1.72 食盐水的电解

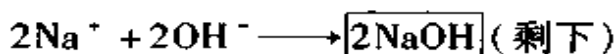
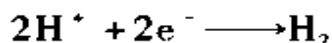
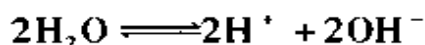
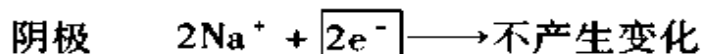
阴离子被吸引向着与电源 $\oplus$ 端相连的电极（阳极），而阳离子被吸引向着与电源 $\ominus$ 端相连的电极（阴极）。因此，各电极与离子间进行电子交换，产生电解。

图 1.72 所示为电子的移动情况。氯化钠在水中电离为钠离子（ $\text{Na}^+$ ）与氯离子（ $\text{Cl}^-$ ），因此若通以电流，则在阳极  $\text{Cl}^-$  放出电子，产生氯气。





由于  $\text{Na}^+$  不易接受电子,因此在阴极附近的水产生电离,生成氢离子( $\text{H}^+$ ),从阴极接受电子,变成氢气。



这样,通过氯化钠水溶液的电解,产生氯气及氢气,剩下氢氧化钠( $\text{NaOH}$ )水溶液。在食盐水中电流流动是因为离子移动而进行的。而砂糖水由于不产生离子,因此不进行电解,电流不流通。

### 1.12.2 有关电解的法拉第定律

如图 1.73 所示,若在硫酸铜溶液中流过电流,则在阴极棒析出铜。能在阴极棒析出铜,是因为具有 $\oplus$ 电的铜离子被阴极吸引,附着在阴极面上进行中和而产生的。这种情况下析出多少量的铜,可以根据电流流过前后的阴极棒的重量求出。这个关系可以归纳如下:

利用电解析出的物质的量,与通过的总电量成正比,还与该物质的化学当量成正比。

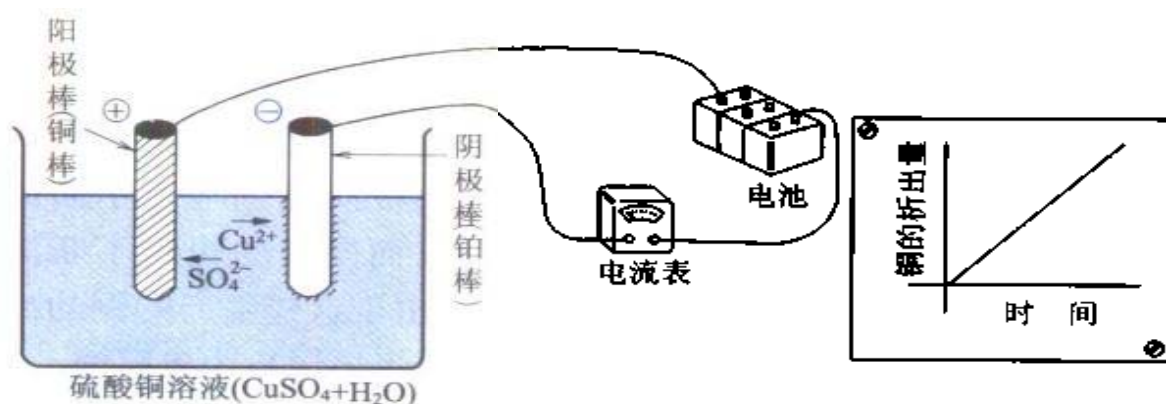


图 1.73 镀铜原理与铜的析出量

将这称为有关电解的法拉第定律。物质的电化学当量因物质而异,表 1.5 所示为部分例子。

表 1.5 物质的化学当量

元 素	符 号	原 子 价	电化学当量[mg/C]
银	$\text{Ag}^+$	1	1.118
铜	$\text{Cu}^{2+}$	2	0.329 2
镍	$\text{Ni}^{2+}$	2	0.304 1
锌	$\text{Zn}^{2+}$	2	0.338 8
钠	$\text{Na}^+$	1	0.238 3
氧	$\text{O}^{2-}$	2	0.082 9
氯	$\text{Cl}^-$	1	0.367 5

### 1.12.3 电解的应用

电解可用于电镀,这是利用电能将金、银、镍、铜等附着在其它金属表面,形成薄薄的一层(图 1.70)。

水的电解是工业生产氢气及氧气的一种方法,食盐水的电解用来生产氢氧化钠、氯气及氢气。

从矿山挖出的金属含有各种杂质。利用电解对金属进行精炼,由于仅使用电能,不需要与其它物质进行反应,因此几乎不可能混入杂质。该方法称为**电解精炼**。

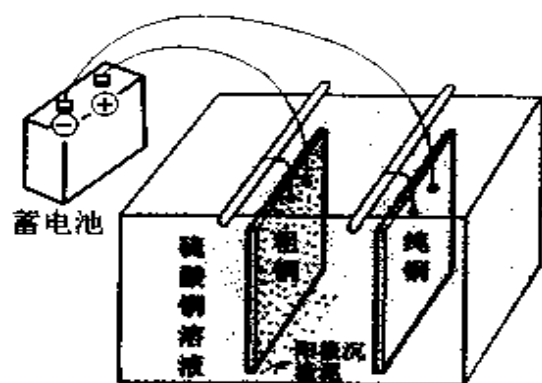


图 1.74 电解精炼(铜)

如图 1.74 所示,在铜的精炼中,将粗铜作为阳极,将另外的薄薄的纯铜板作为阴极,再浸入硫酸铜的稀硫酸溶液中进行电解。于是,在阴极的纯铜板上不断地析出纯铜,而阳极的粗铜不断溶解下去。由于这样生产的铜的纯度极高,故将该铜称为**电解铜**。

另外还有一种利用电解去掉

不需要部分的方法,它与电镀相反,是一种与研磨相同的状态。例如将金属物品放入适当的电解液中,若将金属物品作为阳极进行电解,则物品的金属面上许多尖锐部分被溶解,表面变得平整,增加了光泽度。这样利用电解对金属表面进行研磨的方法称为**电解研磨**。该方法适用于表面形状复杂、难以用机械方法进行研磨的物品。

## 1.13 电池构造及正确的使用方法



图 1.75 各种电池的构造

### 1.13.1 从电池中为什么能得到电流?

将物质起化学变化时产生的能量或光、热等物理能量转变为电能的装置称为电池。

图 1.76 所示为最基本的伏打电池的原理。这里让我们研究一下电的产生过程。

在伏打电池两个电极附近产生的反应如下所述。从锌板表面溶解锌,形成锌离子( $\text{Zn}^{2+}$ ),然后剩下电子,即作为锌电极带负电:

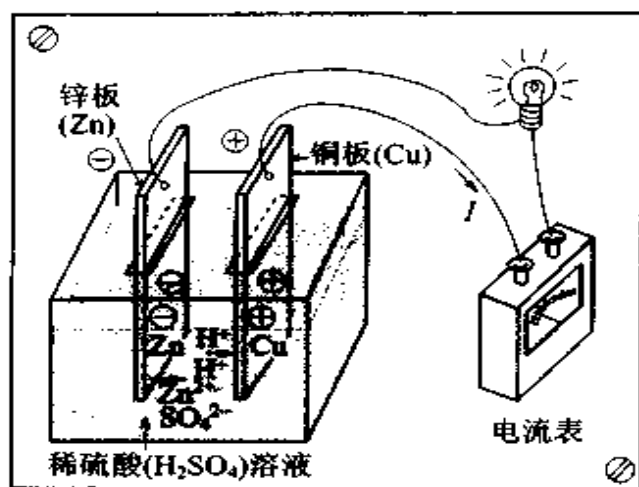
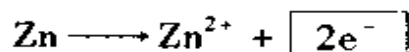
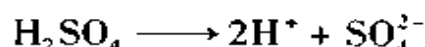


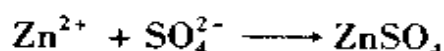
图 1.76 伏打电池的原理

另外,稀硫酸按如下所示进行电离:

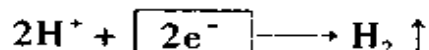


( $\text{SO}_4^{2-}$ :称为硫酸根离子)

溶解在液体中的锌离子( $\text{Zn}^{2+}$ )与硫酸根离子( $\text{SO}_4^{2-}$ )结合,形成硫酸锌:



剩下的氢离子( $\text{H}^+$ )附着在铜板上,形成氢气。如图 1.76 所示,若通过灯泡用导线连接,则锌板剩余的电子就流向铜板,产生下式所示的反应:



这样,电子在导线中从锌流向铜(电流从铜流向锌)。因而,锌板形成阴极,铜板形成阳极,在这之间产生约 1V 的电动势。若将两种金属浸在电解质水溶液中,则与伏打电池相同,电离趋势大的金属(参见图 1.18)为负,电离趋势小的金属为正。

在伏打电池中,若电流持续流动,则很快电压就下降,电流就没有了。这是由于铜板表面附着有氢气泡,妨碍了反应。这称为极化作用。为了防止极化作用,最好在溶液中加入重铬酸钾那样的氧化剂,将铜板处产生的氢进行氧化而生成水。像重铬酸钾那

样的防止极化作用的物质称为去极剂。

### 1.13.2 电池的种类

表 1.6 所示为实用的代表性的电池。有一种电池在放出电流后,反过来即使对电池供给电流(充电),也不能恢复,这种电池称为一次电池,图 1.75 示出的锰干电池、汞电池为具代表性的一次电池。

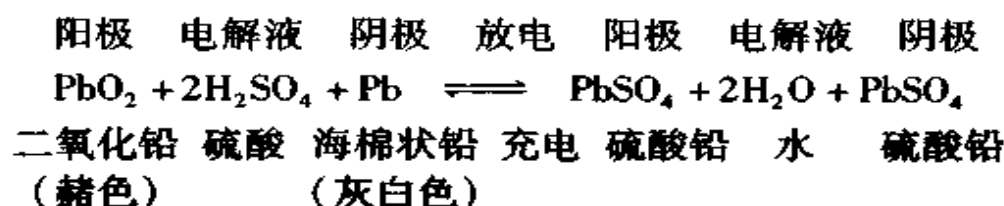
表 1.6 电池的种类

类别	电池名称	电动势 [V]	用 途	(构 造)			
				阳极	阴极	电解液	去极剂
一次 电 池	锰干电池	1.5	照明及通信用	C	Zn	$\text{NH}_4\text{Cl} \cdot \text{ZnCl}_2$	$\text{MnO}_2$
	层叠干电池	1.5	通信用及其它	C	Zn	$\text{NH}_4\text{Cl} \cdot \text{ZnCl}_2$	$\text{MnO}_2$
	汞电池	1.3 ~ 1.4	通信用	Fe	Zn	$\text{KOH} \cdot \text{ZnO}$	$\text{HgO}$
	标准电池	1.018 66	标准电动势用	Ag	Cd	$\text{CdSO}_4 \cdot \text{HgSO}_4$	$\text{HgSO}_4$
二次 电 池	铅蓄电池	2	通信及一般用	$\text{PbO}_2$	Pb	$\text{H}_2\text{SO}_4$	
	碱性蓄电池	1.4	无人电台及一般用	$\text{NiOOH}$	Cd	KOH	

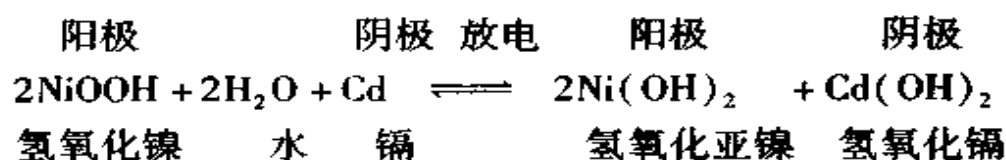
锰干电池具有图 1.75(a)、(b)所示的构造,阳极采用炭棒,混合剂采用二氧化锰及氯化锌水溶液,阴极采用锌。图 1.75(c)所示为汞电池的构造。阳极活性物质采用氧化汞,阴极活性物质采用粒度一致的锌粉。

与一次电池相对应的称为二次电池,是可以通过充电恢复至初始状态而能够再使用的电池。代表性的有铅蓄电池及碱性蓄电池。图 1.75(d)、(e)所示为铅蓄电池及碱性蓄电池的构造。充放电的化学变化如下所示:

[铅蓄电池]



## [碱性蓄电池]



## 1.13.3 电池的正确使用方法

干电池的正确使用方法:干电池的保存要选择避免阳光直射、高温及多湿的地点。另外,若间歇使用,则能够有恢复作用,并能长久使用。

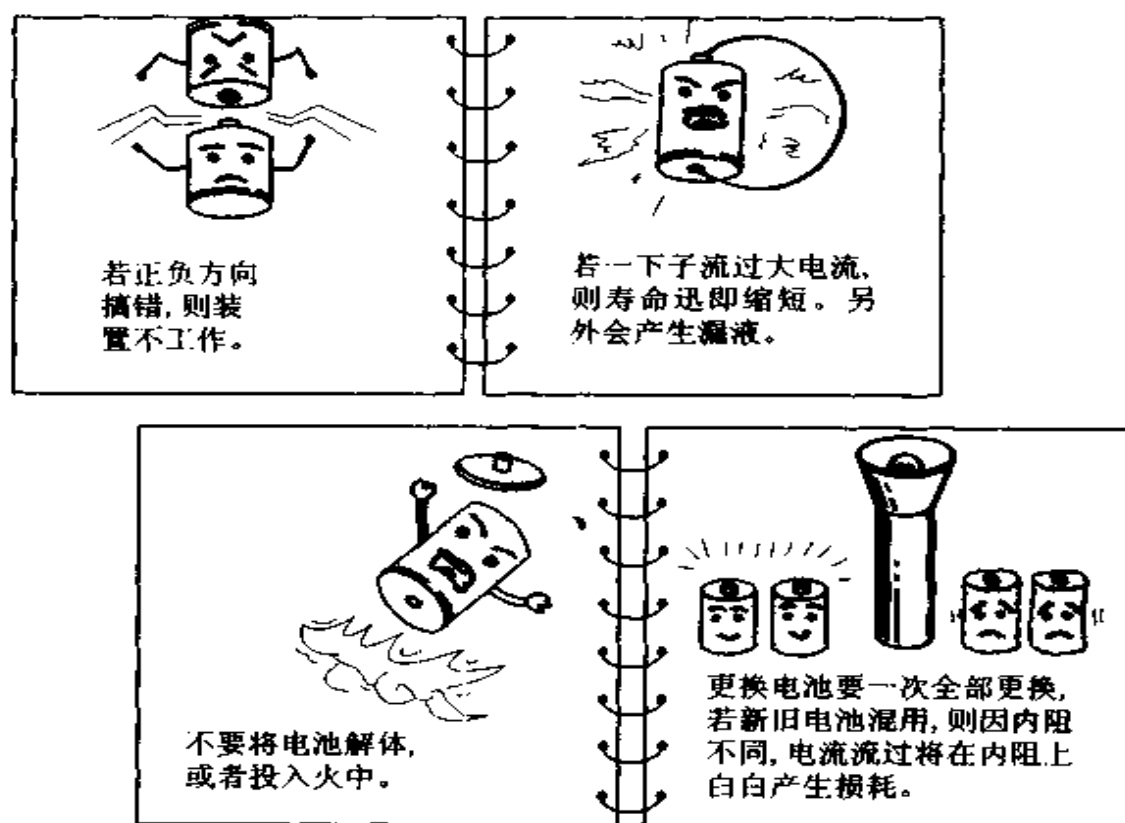


图 1.77 干电池的使用

蓄电池的使用方法:除了干电池的注意事项以外,还有不要过放电(使用电压的 80% 以下),放电后立即充电,不要并联充电,长期保存时约每 1 个月充电 1 次。万一漏液或破损而使电解液沾在皮肤或衣服上时,可用大量的水冲洗。另外,不要弄脏接线端。

# 1.14 充电的方法

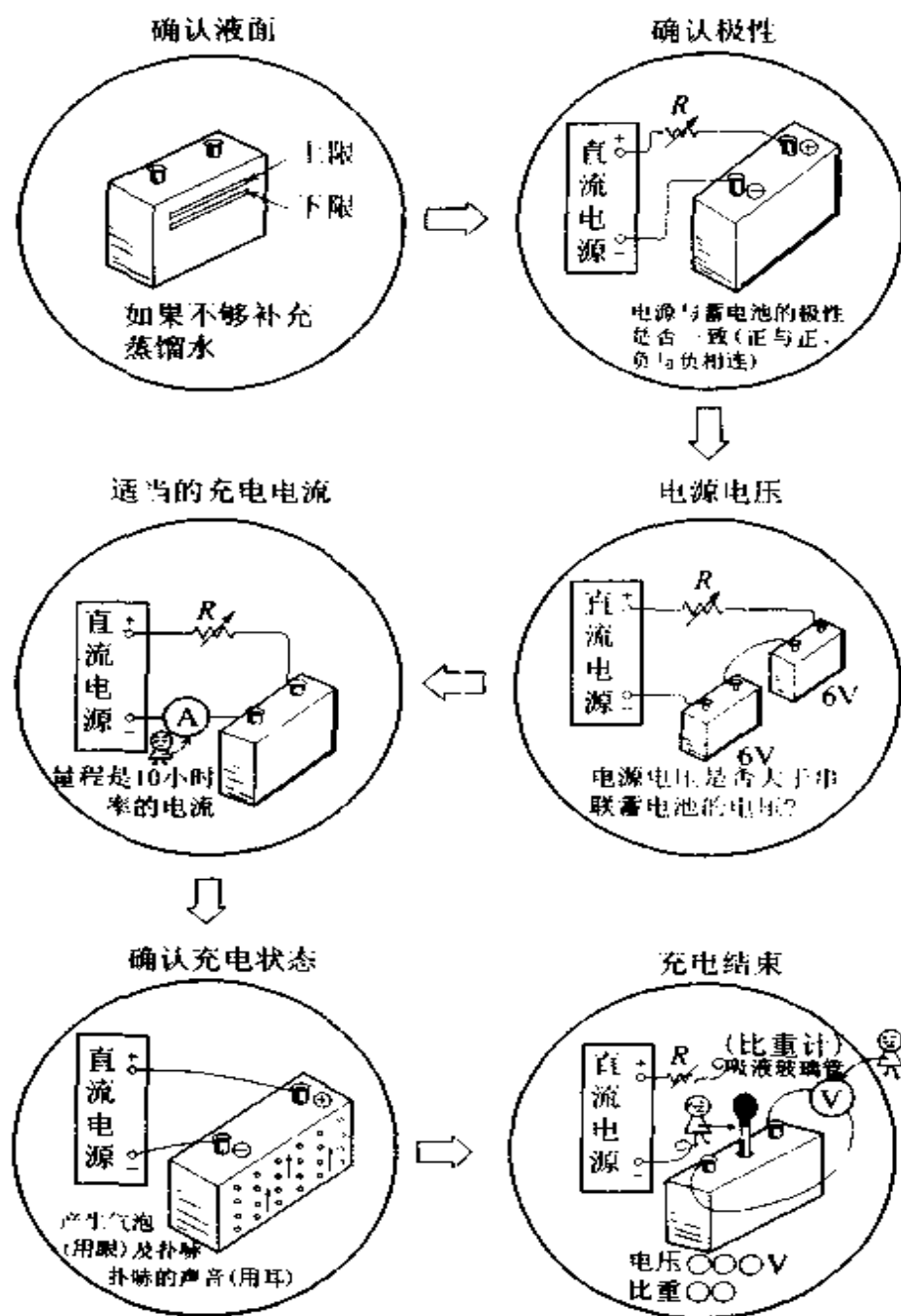


图 1.78 充电的方法



## 1.14.1 电池的使用方法

电池不是无论多少电流都能自由取出的。电池由于有内阻,因此电池端电压要随外部连接的电阻大小而变化。如图 1.79 所示,由于电池端电压为电池的电动势减去内部电压降 ( $Ir$ ),因此使用电池时,除了外部电阻以外,还必须要充分考虑电池的内阻。

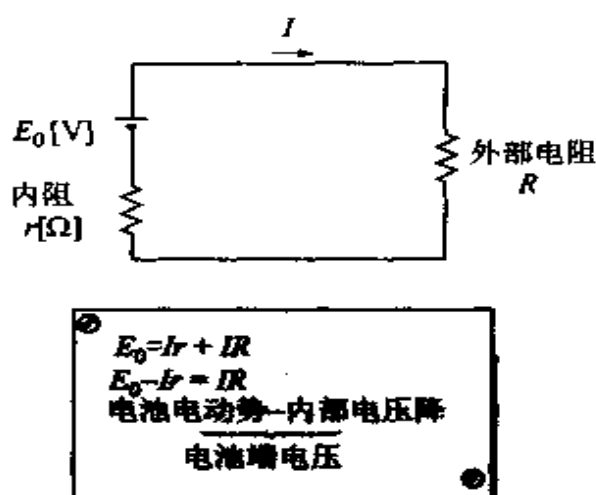


图 1.79

若考虑理想的电池,则电池的串并联如图 1.80 所示。

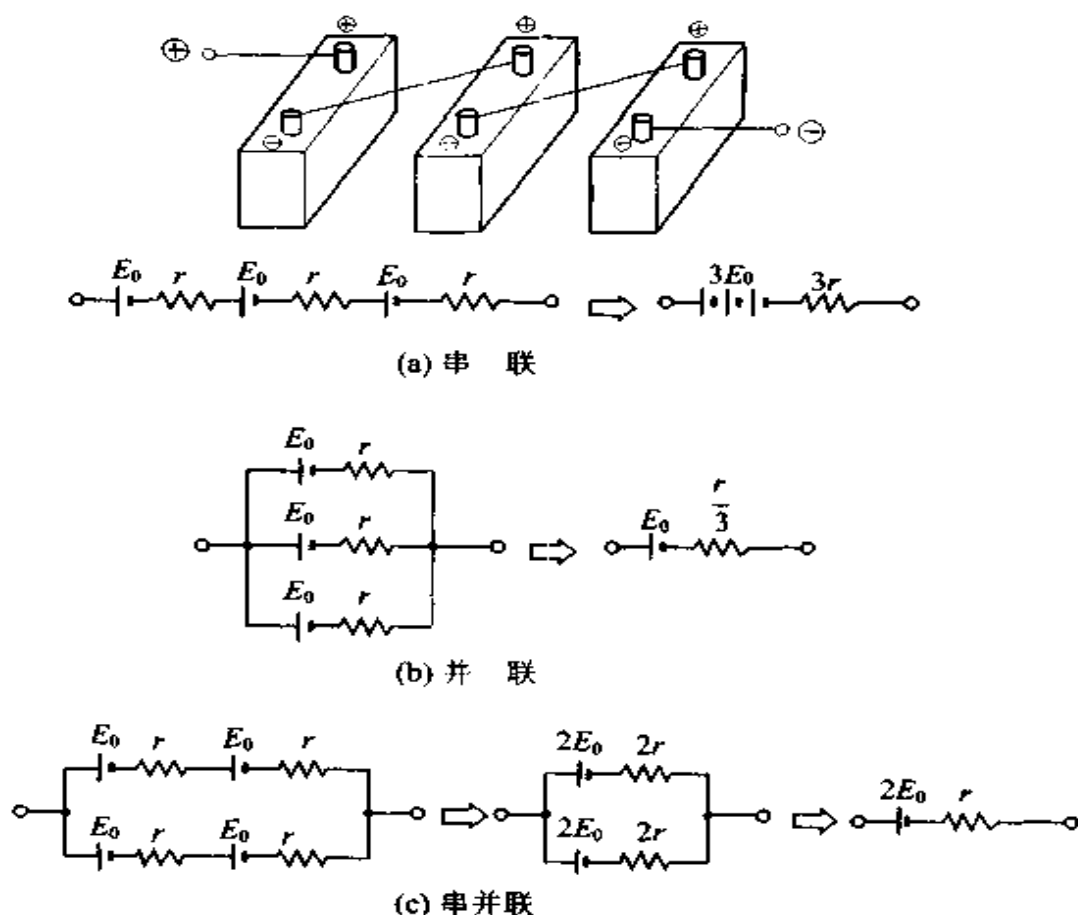


图 1.80 电池的连接方法

为了增加电动势或容量,则必须采用图 1.80 所示的组合形式。

- 将  $n$  个电池串联,则电池电动势为 1 个电动势的  $n$  倍,内阻也为  $n$  倍。

- 将  $n$  个电池并联,则电池电动势等于 1 个电池的电动势,而内阻则为  $1/n$ 。

- 将  $n$  个电池串联,再将  $m$  个这样的串联电池并联,则合成电动势为 1 个电动势的  $n$  倍,内阻为 1 个内阻的  $n/m$  倍。

由上可知,一般要用电池得到较高的电压,则采用串联。在希望要大电流时,采用并联。而需要大电流、高电压时,则要采用串并联。但是,在并联中,如果各电池的内阻或电动势不相等,则会产生电池短路那样的结果,因此实际上不采用并联。

### 1.14.2 铅蓄电池的容量及放电率

电池随着放电,电解液会变稀,电池的电动势下降。图 1.81 所示为铅蓄电池的充放电特性。

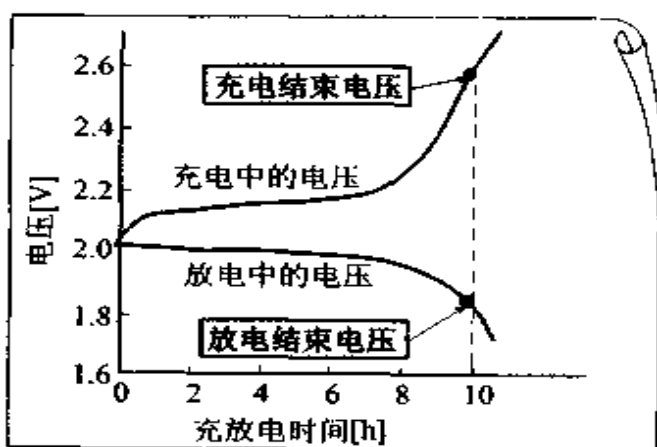


图 1.81 铅蓄电池的充放电特性  
(10h 放电率)

充电时与放电相反,随着充电,电压一点点上升,到充电结束,电压急剧上升,达到 2.6V 左右,充电停止。放电时,一达到 1.8V,则电压开始急剧下降。这时作为放电界限,称为放电终止电压。电池容量用充满电的电池进行放电直到放电终止电压的电量(电流  $\times$  时间的积)来表示,单位符号用  $A \cdot h$ 。

$$\text{电池容量}[A \cdot h] = \text{电流} \times \text{放电时间}[A \cdot h]$$

所谓 10h 放电率是表示以一定电流放电经 10h 达到放电界限。

### 1.14.3 铅蓄电池的充电方法

① 恒流充电:是初充电等采用的充电法。以 10 ~ 20 小时率的恒流进行充电,但由于电解液的温度等原因,电池电压有变化,必须调节电流,故不适于长时间充电。

② 阶段充电:是随着充电的进行逐步降低电流的方法。最初以 3 ~ 5 小时率的电流开始充电,一定时间后或端电压达到 2.4V 时,减小电流,再重复减小电流 2 ~ 3 次,最后以 10 ~ 20 小时率的电流充电。充电中,液温上升严重时,减小电流。

③ 恒压充电:每个电池约加上 2.3 ~ 2.5V 的电压进行充电。但是,由于随着充电进行,电流发生变化,因此必须要充分注意。

④ 过充电:由于很难对蓄电池进行均衡充电,另外放电特性也多少有些不同,因此有时充电也会没有充足。从补充不足的意义来说,在充电结束后,再以 20 小时率左右的电流继续充电 1 ~ 3h,或随时进行这样程度的充电,使所有电池都充足电,这称为过充电或均衡充电。

图 1.82 所示为蓄电池的浮动充电方式。将整流器、蓄电池与负载并联,使电压保持为一定值  $F[V]$ ,该电压称为浮动充电电压。在该方式中,平常负载电流全部由整流器负担,蓄电池仅取得一点点电流( $I_0$ )以弥补蓄电池的自放电。停电时,蓄电池负担负载电流( $I_L$ ),一旦恢复供电,则整流器一面负担平常的负载电流,一面对蓄电池进行充电。这样的蓄电池浮动充电的优点有:

(1) 在通电时,负载由整流器供电,停电时,由蓄电池供电,因此不会产生瞬时停电,电压变动少,能稳定供电。

(2) 蓄电池长时间保持过充电的最佳电压,没有充电不足的现象,因此寿命长。

(3) 整流器只要负担平常的负载电流及蓄电池的充电电流,而蓄电池只要负担短时间的大电流负载及停电时的负载,因此整流器及蓄电池都只要小容量即足够。

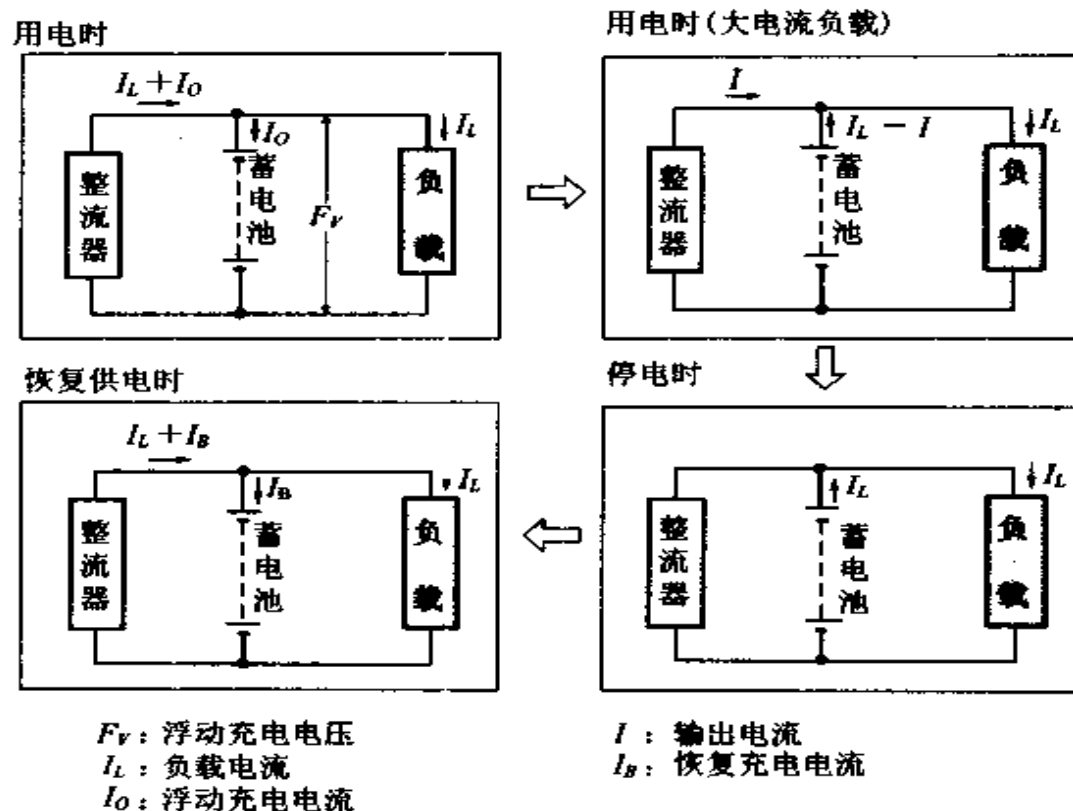
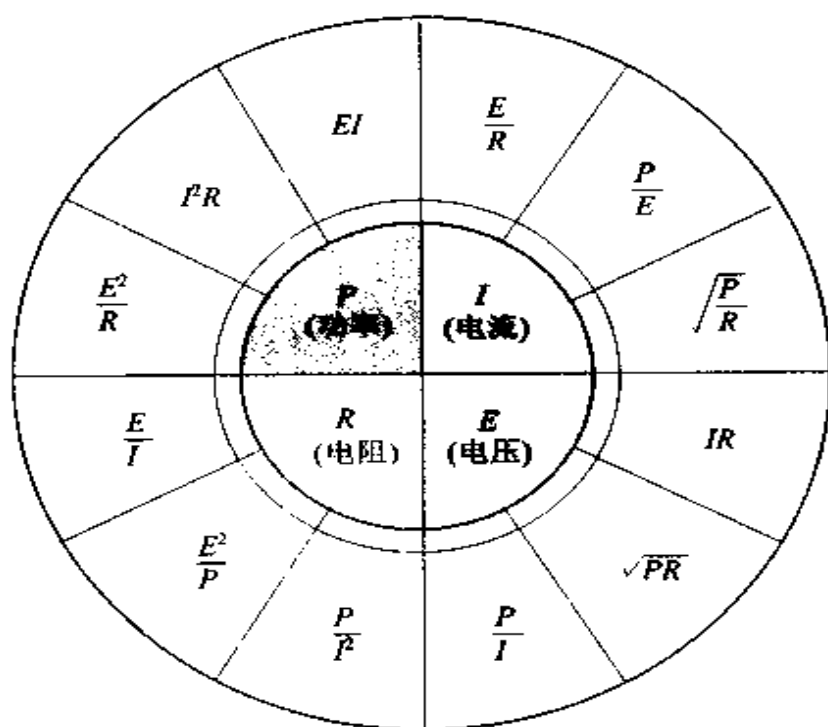


图 1.82 蓄电池浮动充电的电流流向

## 本章小结



电路计算公式的转盘表示

**欧姆定律**

电路的电动势等于流过电路的电流与电阻的乘积

$$E = IR \quad [\text{V}]$$

**电阻的串并联与等效电阻**

串联的等效电阻  $R_0 = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n = \sum_{n=1}^n R_n \quad [\Omega]$

并联的等效电阻  $\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} = \sum_{n=1}^n \frac{1}{R_n}$

所以  $R_0 = \frac{1}{\sum_{n=1}^n \frac{1}{R_n}} \quad [\Omega]$

**串并联的等效电阻**

$$R_0 = \sum_{n=1}^n R_n + \frac{1}{\sum_{n=1}^n \frac{1}{R_n}} [\Omega]$$

**电表的倍率**

电压表  $V = \frac{r_v + R_m}{r_v} V_v = \left( 1 + \frac{R_m}{r_v} \right) V_v$   
 ( $R_m$ : 倍压器的电阻,  $r_v$ : 电压表的电阻)

倍压器的倍率  $n = 1 + \frac{R_m}{r_v}$

电流表  $I = \frac{r_a + R_s}{R_s} I_s = \left( 1 + \frac{r_a}{R_s} \right) I_s$   
 ( $R_s$ : 分流器的电阻,  $r_a$ : 电流表的电阻)

分流器的倍率  $m = 1 + \frac{r_a}{R_s}$

**电桥的平衡条件**

$$\frac{R_B}{R_A} = \frac{R_x}{R_s}$$

**焦尔定律**

$$H = I^2 R t [\text{J}] = 0.24 I^2 R t [\text{cal}]$$

**功率及电能**

$$P = I^2 R = IV = \frac{V^2}{R} [\text{W}]$$

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} \approx 860 \text{ kcal} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

**法拉第定律**

$$\boxed{\text{电解析出物质的量}} = \boxed{\text{该物质的化学当量}} \times \boxed{\text{电流}} \times \boxed{\text{时间}}$$

**电 池**

一次电池不能充电, 二次电池能够充电。

# II

## 电与磁

---

电除了前面已经学习过的作用以外,还有一个重要的作用就是产生磁场。

人们早就知道,地球上存在磁铁,但证实地球本身也是一个大磁性体时,谁都感到非常惊讶。

但一旦更详细地研究磁铁的性质就知道,磁与电相互之间有很密切的关系。其中之一是利用线圈可以由磁产生电动势,产生力。电动机及发电机正是巧妙地利用了这一作用。

在本章中将学习磁铁的性质及有关电与磁相互关系的基本定律,进而学习平常使用的电动机及变压器的构成要素。

## 2.1 磁铁的磁场

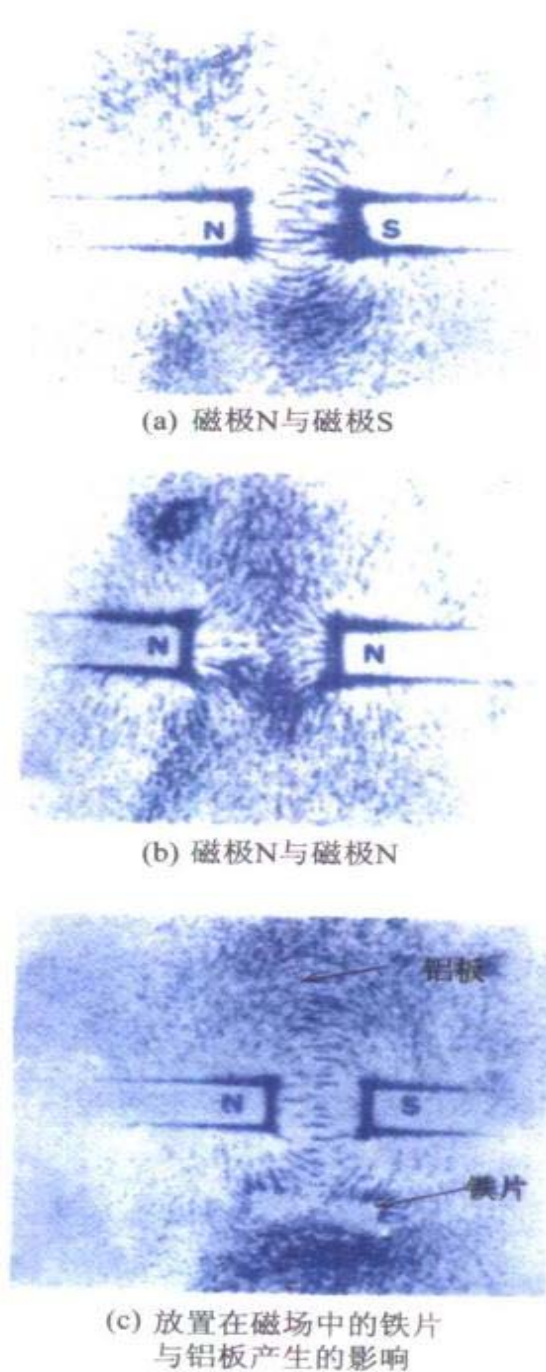


图 2.1 磁铁及铁粉

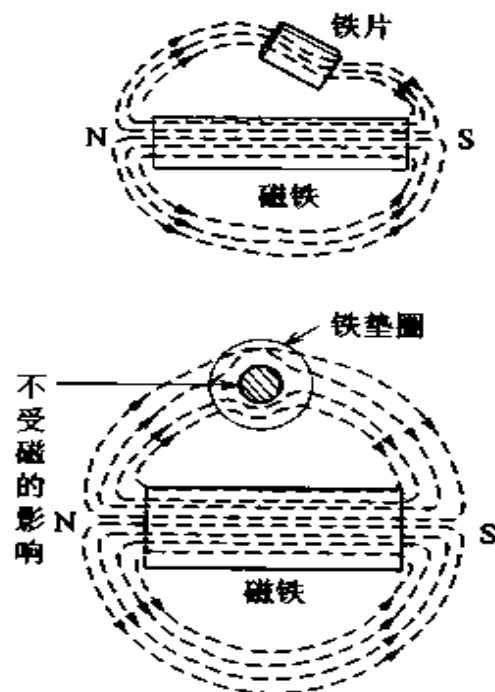


图 2.2 磁力线的路径

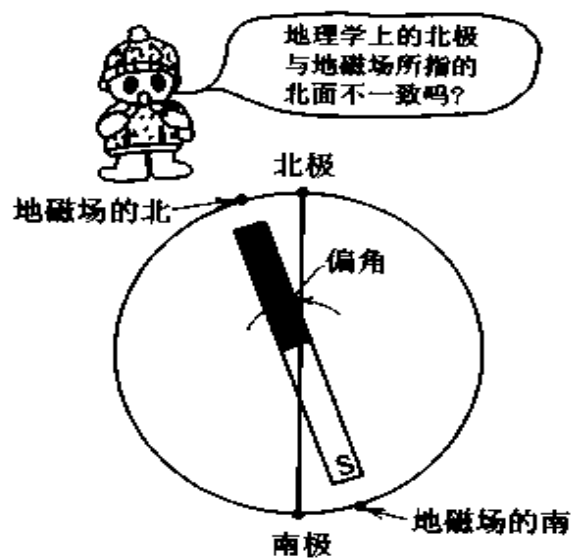


图 2.3 地磁场与偏角



### 2.1.1 磁极与磁铁的性质

我们根据经验知道,在磁铁的周围存在磁场。例如,若磁铁两端靠近铁钉,就会牢牢吸住,但在磁铁中间附近却很难吸住,若将磁铁放入铁粉中再取出,则仅在磁铁两端吸附了大量的铁粉。这样,将牢牢吸附铁粉的部分称为磁极,一块磁铁有两个磁极,分别具有不同的性质。

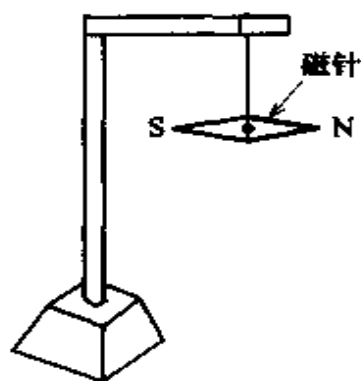


图 2.4

如图 2.4 所示,吊着一个小磁针,使其能自由旋转,则其一端指向北。即使再使磁针旋转,最后也回到原来的位置。这是由于,地球本身是一个大磁铁,它与吊着的

磁针之间有磁力的作用。这样,将指向北的磁极称为 N 极,相反的一侧磁极称为 S 极。

#### • 磁铁的性质

- (1) 磁铁两端能吸附铁片等。
- (2) 吊着的磁针能指南北。
- (3) 磁铁两端必有相同强度的 N 极与 S 极,不存在仅有单一磁极的磁铁。

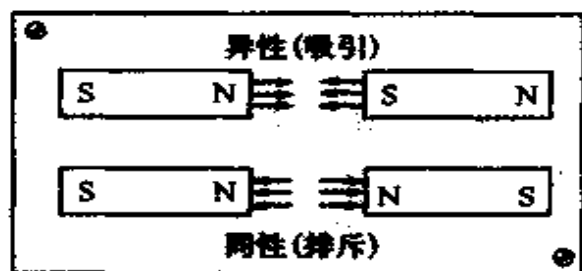


图 2.5

- (4) 作用于磁铁的力是, N 极与 N 极、或 S 极与 S 极之间为排斥力, N 极与 S 极(异性磁极)之间为吸引力(参见图 2.5)。

将这样的磁铁性质称为磁性,将磁铁间作用的力即由于磁而产生的力称为磁力。

### 2.1.2 磁力与磁场的关系

利用前述磁铁的性质来研究作用于磁铁间的力的关系,可知有下述的性质。

磁力与两个磁极强度的乘积成正比,与两磁极间的距离平方成反比。

这是法国的库仑通过实验发现的,称为有关磁的库仑定律。

设两个磁极的强度为  $m_1$  及  $m_2$ , 相互间的距离为  $r[\text{m}]$ , 则力  $F$  为

$$F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [\text{N}]$$

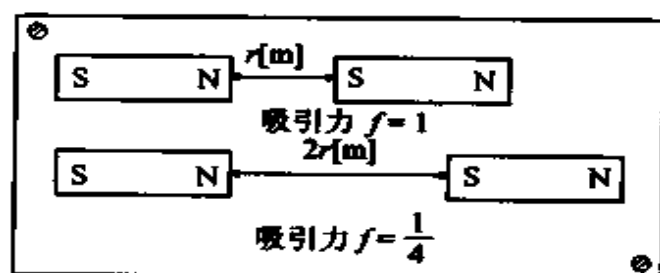


图 2.6 磁极的吸引力

式中,磁极的强度  $m_1$  及  $m_2$  的单位采用韦伯(单位符号为 Wb),力  $F$  的单位采用牛顿(单位符号为 N)。在真空中,比例常数用  $6.33 \times 10^4$  表示,因此力  $F$  如下所示:

$$F = 6.33 \times 10^4 \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [\text{N}]$$

磁场强度是在磁场中放置 1Wb 的磁极时用对该磁极作用的磁力的大小及方向来表示,将该磁力的大小作为该点磁场的大小,用该磁力的方向作为磁场的方向。

磁场强度的单位为安培每米(A/m),若对磁场中放置 1Wb 的磁极所作用的力为 1N,则磁场强度为 1A/m。

• 1 韦伯的磁极产生多大的力? 两个强度分别为 1Wb 的磁极,其距离为 1m 时的力  $F$ ,在真空中与空气中几乎没有变化,因此用式(1)可求出

$$F = 6.33 \times 10^4 \frac{1 \times 1}{1} = 6.33 \times 10^4 \text{ N}$$

这里,由于 1kg 重量等于 9.8N 的力,因此

$$\frac{6.33 \times 10^4}{9.8} \approx 6.46 \times 10^3 \text{ kg} = 6.46 \text{ t}$$

### 2.1.3 磁通与磁场的关系

为了详细研究磁场,将玻璃板或硬纸板放在磁铁上,再在其上撒上细铁粉,然后轻敲其端部,则如图 2.7(a)所示,铁粉沿曲线形状排列。若如图 2.7(b)所示,将小磁针放在该曲线上则可知,在磁铁周围沿该曲线有相同方向的磁力在作用,该磁力的作用可以看成从磁极向其周围发出磁通(也称为磁力线),有磁通的地方就有磁场。

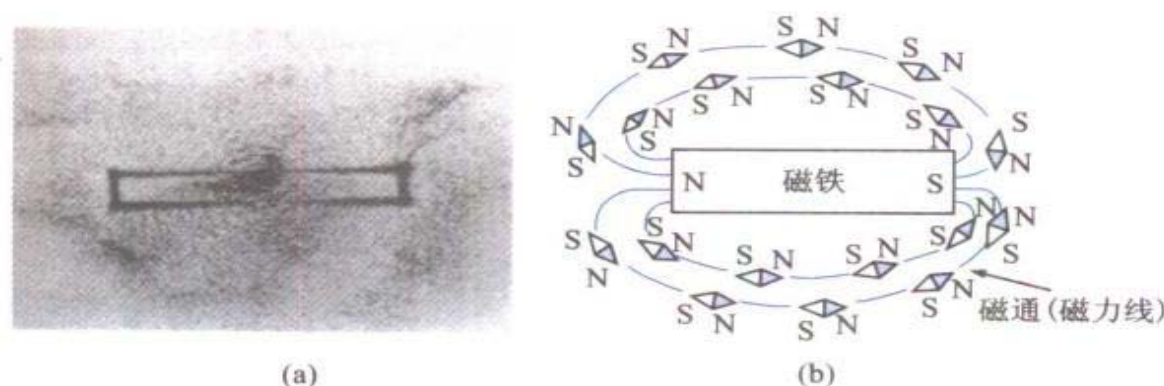


图 2.7 磁铁的磁力线(磁通)

### 2.1.4 在地球上为何磁针指南北?

英国物理学家吉尔伯特在地球上任何地方放置磁针,发现指向一定方向,从而发现地球也是一个大磁性体。地球的磁场称为地磁场,其方向大致指向南北方向,与地球上的地理南北多少有一点差别,该磁针所指的方向与地球的南极与北极方向之差的角度称为方位角或磁偏角(参见图 2.3)。地磁场是登山及航海所不可缺少的前进标志。另外,若使磁针在垂直面内也能自由运动,则随着从赤道附近逐渐接近南北极,磁针的尖端逐渐向下。该磁针与水平面的夹角称为磁倾角。东京附近的磁偏角为  $5.5^\circ$ ,磁倾角为  $48.8^\circ$  左右。为了表示某一地点地磁的状态,还必须要知道该地点磁场的大小。地磁场在水平方向的强度称为水平分量,若知道水平分量及磁倾角,则可求出该地点地磁场的大小。图 2.8

所示为地磁场的三要素。

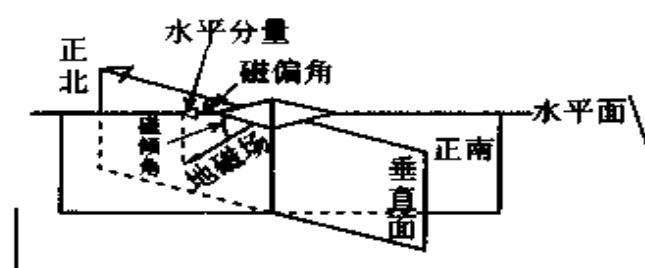
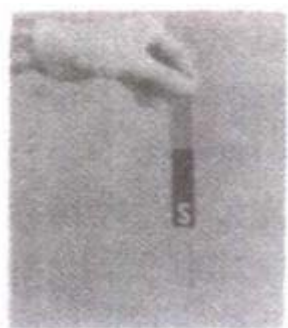


图 2.8 地磁场的三要素

## 2.2 金属磁化的条件



铁钉的磁化



磁带与磁头

图 2.9 各种金属磁化的状态

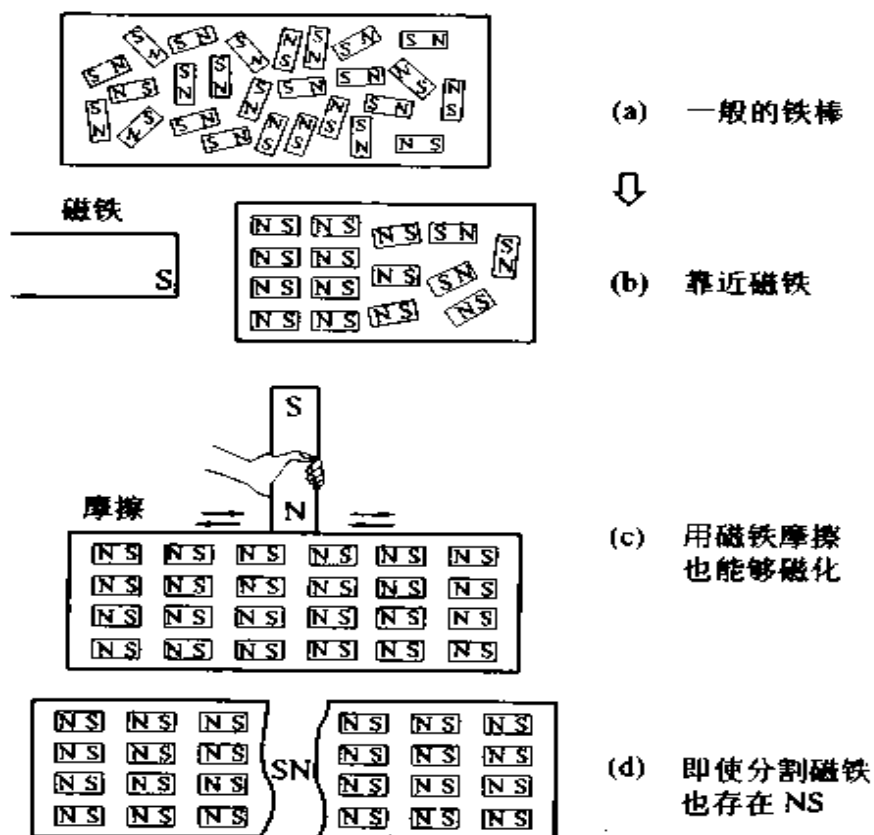


图 2.10 形成磁铁的过程

### 2.2.1 什么样的金属能构成磁铁

若将铁钉靠近图 2.9 那样的 U 字形磁铁或棒状磁铁, 则被磁极吸住。一个铁钉的头吸住以后, 在它的尖端常常还可吸住另一个铁钉。这是由于磁铁使最初的一个铁钉已完全变成磁铁, 从而也能吸住另一个铁钉的结果。使铁具有磁性, 即变成磁铁的过程称为铁的磁化过程。总而言之, 一靠近磁铁, 铁就受到吸引力, 一旦吸住, 就变成原来磁铁的一部分, 就再吸引新的铁, 使之磁化。这样的现象称为磁感应, 铁钉那样的东西称为磁性体。磁性体中除了铁以外, 还有镍、钴等, 若再进行各种研究发现, 容易磁化的物质还有另外的物质。若物体被磁化, 则如图 2.11 所示, 靠近磁铁 N 极的表现 S 极, 而另外一端表现为 N 极。这样的物质称为顺磁性体, 铁、镍、钴、锰等由于进行特别强的磁化, 因此称为强磁性体。其它铝、铂、锡也是顺磁性体。与此相反, 如图 2.11(b) 所示, 靠近 N 极的表现 N 极的材料有铋、铜、铌、木料, 还有氢等气体, 这称为反磁性体。

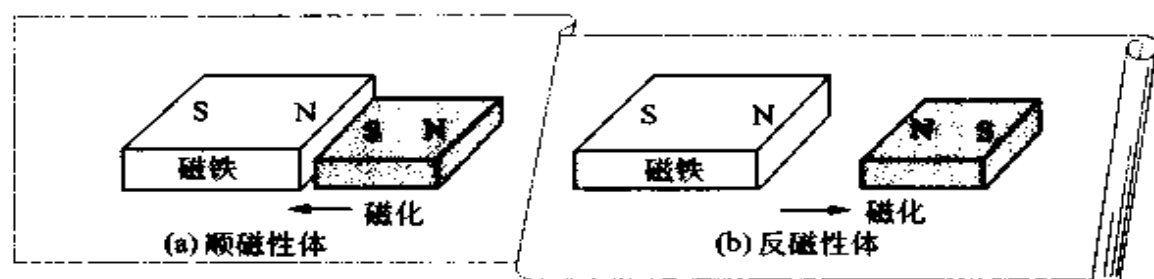


图 2.11 磁性体的种类

将铁钉放在强磁场中, 铁钉就被磁化, 若用铁钉在磁铁上摩擦, 则磁化更强。但是, 一离开磁铁, 磁就消失, 又恢复成原来的铁钉。与此相反, 若将钢片磁化, 则即使远离磁铁, 也有剩余磁场。将此称为剩磁。像铁钉(软铁)那样, 利用磁铁产生磁化, 但一离开磁铁, 磁就消失, 这称为暂时磁铁。而像钢那样, 若一旦磁化, 则永远是磁性体, 这称为永久磁铁。

### 2.2.2 构成磁铁的原因

为了说明磁铁的作用及铁或其它金属被磁化的原因,采用磁分子的说法比较容易理解。但是,现在认为又划分成所谓磁畴这样的微小区域,分别存在分子磁荷。

关于磁铁,人们提出了下面三个疑问。

(1) 为什么靠近 N 极会产生的是 S 极?

(2) 磁铁为什么在中间部分几乎不显出 N 及 S 的性质?

(3) 为什么将磁铁一切为二,再切得更小,而仍然 N 与 S 显出相同的强度?

在解释这些疑问之前,先简单说明磁分子学说(也称为分子磁荷学说)。

在所有物体内部,存在着成对的 N 极及 S 极组成的极微小的磁性体,处于未磁化状态的物体,如图 2.10(a) 所示,这些磁性体无规则地处于分散的位置,因此不显示作为磁性体的性质,即相互抵消。一旦靠近 N 极,则如图 2.10(b) 所示,分子磁荷的 S 极全都被 N 极的磁力吸引,改变成排得整整齐齐的样子,分子磁荷的 S 极指向靠近棒状磁铁的 N 极一边,显示出 S 极的性质。若磁铁越强,或进行摩擦,则分子磁荷的排列情况越整齐,因此磁化程度越高[参见图 2.10(c)]。但是如前所述的反磁性体物质(铍、铜等),虽具有分子磁荷,但难以运动,或显示出相反的性质。

图 2.12 是用图解释上述(1)、(2)、(3)等疑问的示意图。

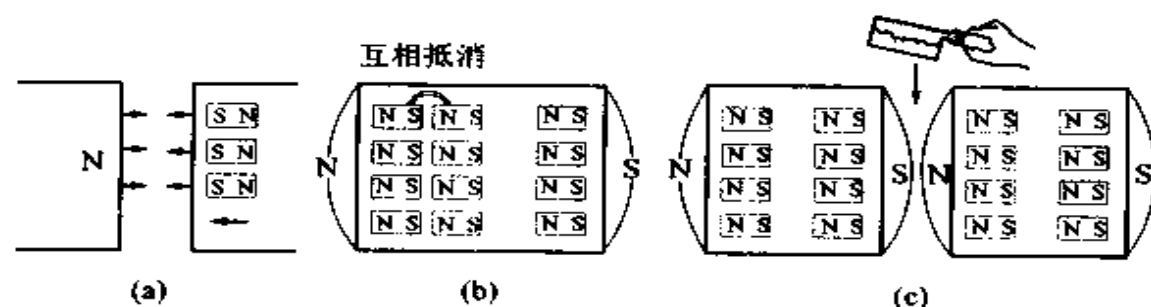


图 2.12 分子磁荷的说明

### 2.2.3 磁化强度

已经知道,铁在磁场中产生磁化,磁场越强,则得到的磁铁越强,但是,如图 2.13 所示,无论怎么增加磁化强度,但铁的磁通密度在达到一定大小后就不再增加。这种现象称为磁饱和。

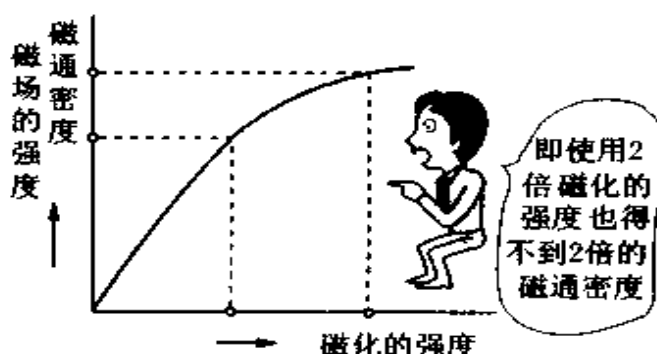


图 2.13 磁饱和曲线

若根据分子磁荷学说来说明这一现象,则如前所述,在没有被磁化时,许多分子磁荷向着各自任意的方向而存在,由于磁场的影响,分子磁荷受到磁感应,开始朝向一定的方向。随着磁化强度增加,磁场的强度(磁通密度)也增大,但若分子磁荷的取向全部结束,磁通密度就不会再增加。这就产生了磁饱和现象。

### 2.2.4 真空中磁场的强度

靠近磁极的磁场强的地方磁通密集,而远离磁极的磁场弱的地方磁通稀疏,因此也可以用磁通密度表示磁场强度,真空中或空气中  $1\text{A/m}$  的磁场强度用垂直于该点磁场方向的  $1\text{m}^2$  面积的磁力线数来表示。真空中的磁力线数(用符号  $\mu_0$ ,称为真空中的磁导率<sup>1)</sup>)由下式决定:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

1) 磁导率表示磁通通过物体时的容易通过的程度,在空气及真空中,由于单位制的关系,用  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 。



一般将通过垂直于磁场方向的  $1\text{m}^2$  面积的磁通量称为磁通密度[单位为特斯拉(单位符号为 T)]。真空中或空气中的磁场强度  $H[\text{A/m}]$  与磁通密度  $B[\text{T}]$  的关系用下式表示:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{4\pi \times 10^{-7}}$$
$$B = \mu_0 H = 4\pi \times 10^{-7} H$$

## 2.3 电流产生磁场

### 电流产生磁场



图 2.14 电磁铁的原理

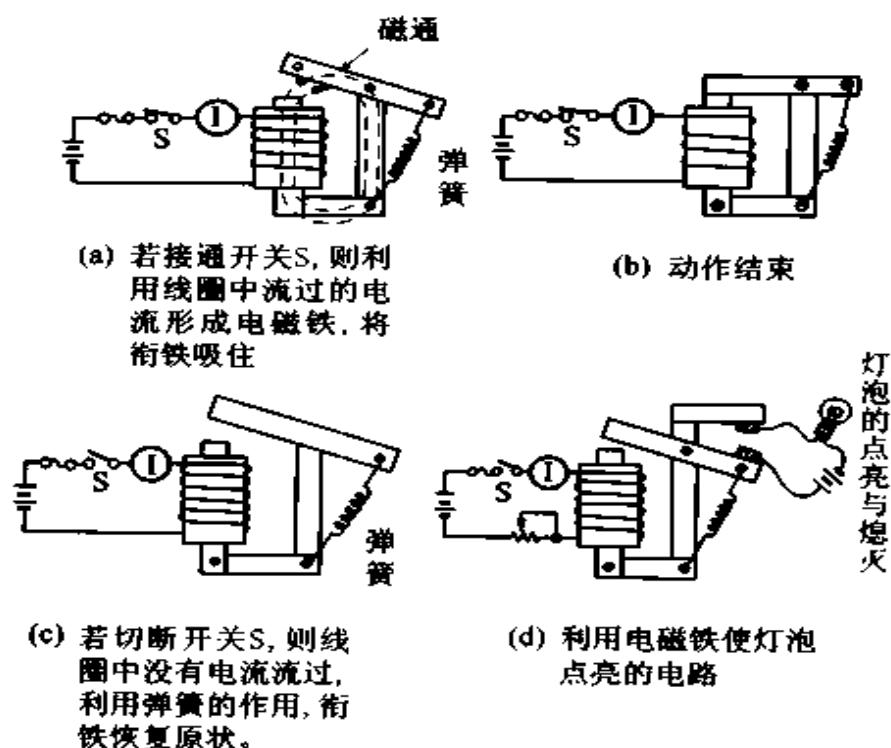


图 2.15 电磁开关的应用

磁场的大小

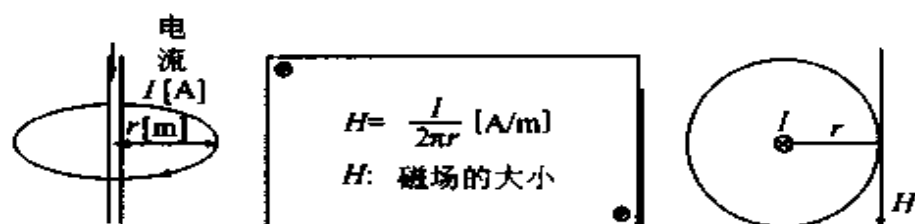


图 2.16 电流产生磁场的大小

## 2.3.1 电流流过导线而产生磁场

如图 2.17(a) 所示, 将一根导线拉直平行放在磁针 NS 的旁边(磁针指向地磁场方向静止不动), 若导线中有电流流过, 则磁针如图(b)所示, 相对于电流的方向向右转, 在接近直角的位置磁针停止。由该实验可知, 导线中一旦流过电流, 就在导线周围产生磁场, 因此磁针指向该磁场与地磁场的合成磁场的方向。实际上由于地磁场极弱, 因此接近成直角。如图(c)所示, 若流过导线的电流反向, 则磁针完全旋转  $180^\circ$ , N 极和 S 极的位置对调。这是由于, 因电流方向改变, 导线周围产生的磁场的方向也改变。下面研究一下电流与磁场的关系。

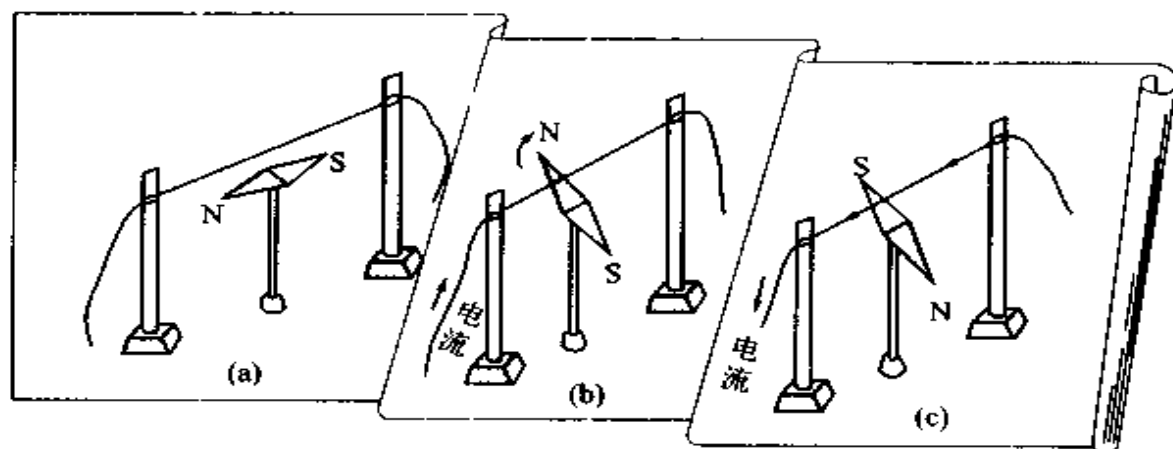


图 2.17 直流电流产生的磁场

### 2.3.2 电流的方向决定磁场的方向

(a) **直流电流产生的磁场方向** 由上面的实验也已经知道, 随着电流方向改变, 磁针转过  $180^\circ$ 。这个实验重复多次, 都得到同样的结果。再做一下图 2.18 所示的实验。将一个线圈穿过厚纸的中间部分, 在厚纸上撒上细铁粉, 合上开关 S, 轻轻敲击厚纸, 则铁粉如图 2.18 所示, 以线圈为中心排列成许多同心圆形状, 由此可知, 若导线中流过电流, 则绕导线产生圆形磁场。接着改变电池极性, 改变电流方向, 但仍然产生相同的圆形磁场。为了研究磁场的方向, 放上小的磁针, 可以知道磁力线的方向随电流的方向而变。若用一句话表示电流与磁场的关系, 则如下所述。

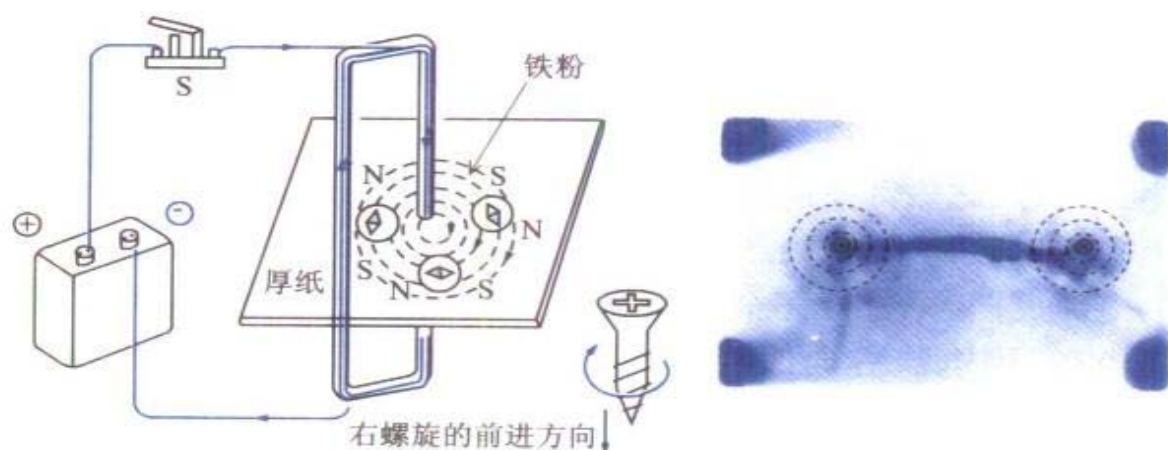


图 2.18 电流产生的磁场

若使电流方向与右螺旋的前进方向一致, 则该电流产生的磁场方向也与右螺旋旋转方向一致。

将这称为安培右螺旋定则或右螺旋定则, 若用图表示, 则如图 2.19 所示。

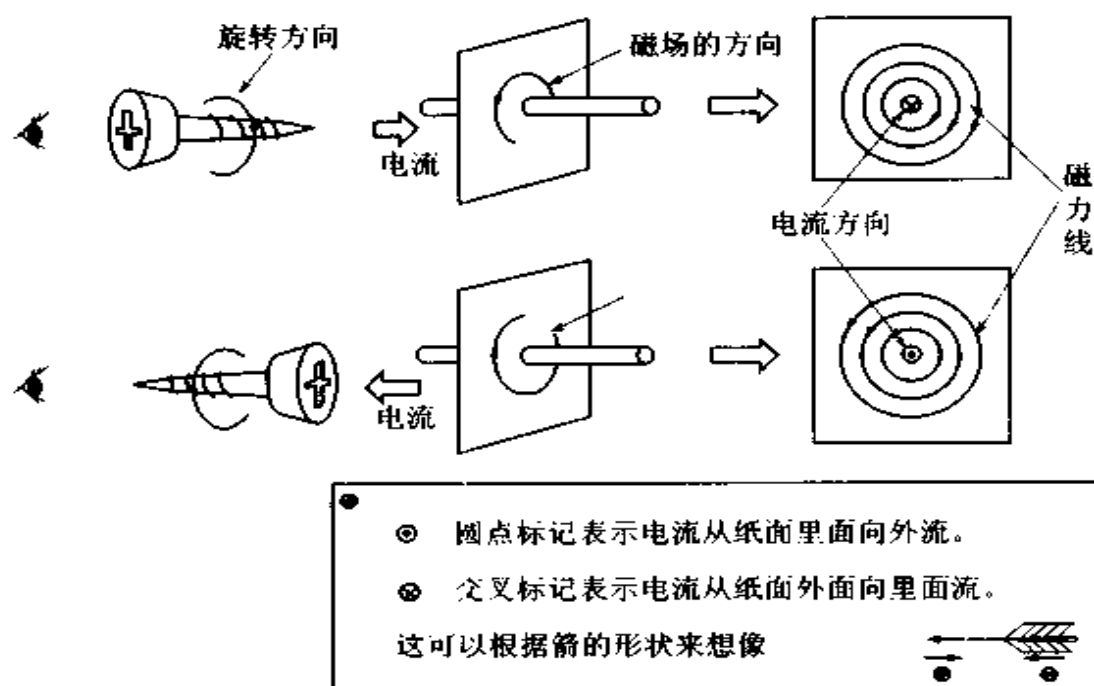


图 2.19 右螺旋与电流方向

(b) 线圈产生的磁场 由于磁场方向是按照右螺旋定则决定的, 因此如图 2.20(a) 所示, 若电流流过 1 圈的圆形线圈, 则产生

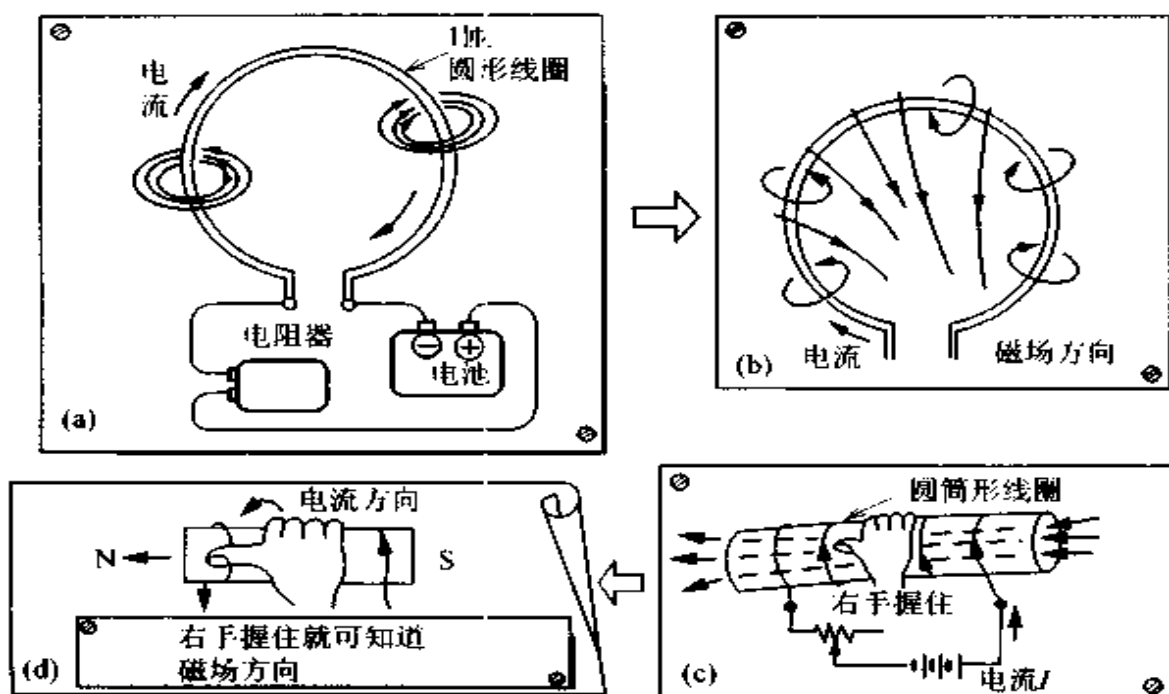


图 2.20 线圈产生的磁场

的磁通方向将如何？由于线圈各部分产生的磁场方向分别遵守右螺旋定则，因此从整体来看，形成图（b）所示的一定方向的磁通。根据上述结果，绕有若干圈的图（c）所示圆筒形线圈中，若电流方向为四指方向，则磁通方向是指向左边（大拇指的方向）。因此如图（d）所示，形成右侧是 S 极、左侧是 N 极的一种电磁铁。圆筒中如果插入铁心，或增加线圈匝数，或增大电流，就能够形成强力电磁铁。

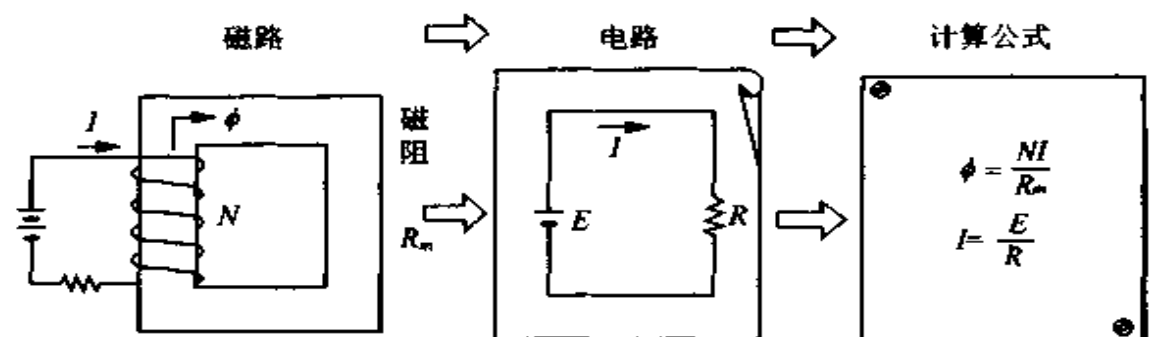
### 2.3.3 磁场强弱

流过直线导体的电流产生的磁场，如图 2.16 所示，为以电流为中心的圆形形状，设半径为  $r$  [m] 的圆周上的磁场强度为  $H$  [A/m]，流过导体的电流为  $I$  [A]，则磁场强度用下式表示：

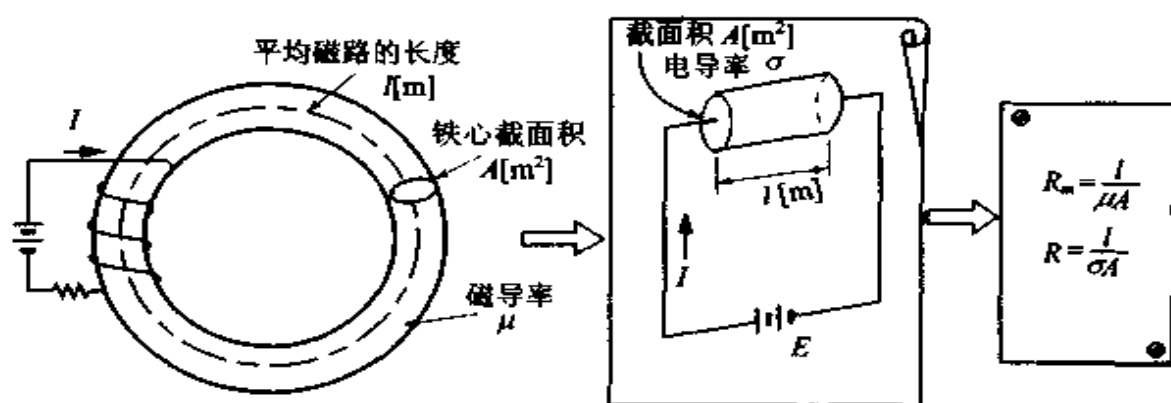
$$H \times 2\pi r = I$$

所以 
$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad [\text{A/m}]$$

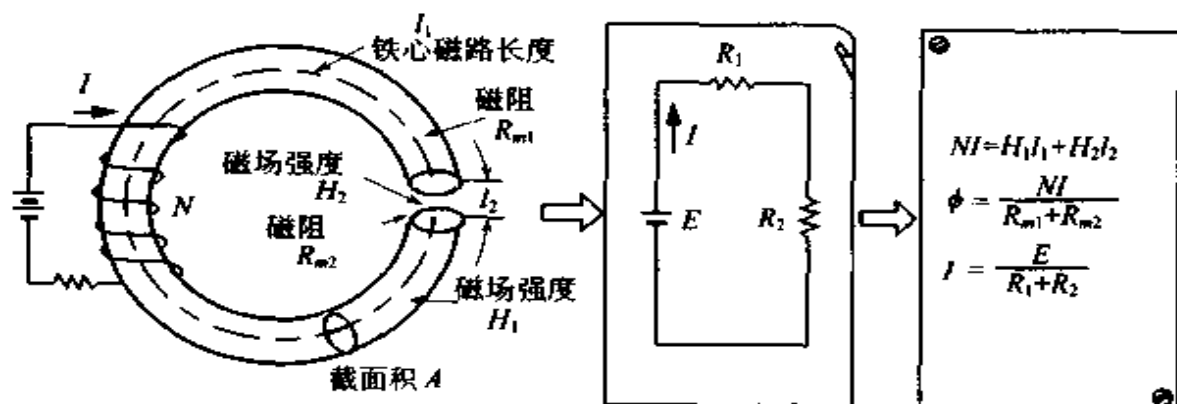
# 2.4 磁路构成



(a) 磁通势与磁阻



(b) 磁阻的性质



(c) 磁路中有气隙的情况

图 2.21 磁路与电路

在前一章叙述了由电产生磁的情况,与此相反,还有由磁产生电的现象。磁与电有着极其密切的关系。发电机及变压器完全是利用磁的性质构成的。图 2.21 的回路具有磁通的产生源及磁通的通路。利用线圈中流过电流而产生磁通,为了将该磁通引导至需要的地方,采用了磁通容易通过的材料。该回路称为磁路。图 2.21 是表示磁路与电路的类比性,望切记。

### 2.4.1 磁路的原动力是磁通势

如图 2.22 所示,铁心上绕有线圈,若线圈中流过电流,则铁心中产生磁通。这种情况下,线圈的匝数越多,或流过的电流越大,则磁通量越大。在这样的磁路中,匝数  $N$  的线圈中流过电流  $I$  [A] 时,则其乘积  $NI$  为产生磁通之源。产生该磁通的原动力称为磁通势,单位用安培 [A] 表示。另外,这时产生的磁通量用  $\phi$  表示,其单位用韦伯 [Wb] 表示。

### 2.4.2 磁路中的磁阻

在图 2.23 中,若磁通势  $NI$  [A] 起作用,则产生磁通  $\phi$  [Wb]。磁路(磁通的路径)的长度越长,产生的该磁通  $\phi$  越小,另外磁路的截面积越小, $\phi$  越不易通过。因此,表示妨碍磁通产生程度的量称为磁阻。磁阻是表示磁通难以通过的程度,用符号  $R_m$  表示,单位用 [A/Wb] 表示。磁通势与磁通的关系为

$$R_m = \frac{NI}{\phi} \quad [\text{A/Wb}]$$

磁阻与磁路的截面积与长度的关系为

$$R_m = \frac{l}{\mu A}$$

$\mu$  称为铁心的磁导率。 $\mu$  的单位用 [H/m] 表示。

$\mu$  越大,磁阻越小,磁导率  $\mu$  相当于电路的电导率,  $1/\mu$  相当于电路的电阻率。所以  $1/\mu$  也称为磁阻率。

• **磁导率与相对磁导率** 若在匝数为  $N$  的线圈中流过电流  $I$  [A], 线圈中加入截面积为  $A$  [m<sup>2</sup>]、磁路长度为  $l$  [m] 的铁心, 设



铁心的磁导率为 $\mu$ ,则产生的磁通 $\phi$  [Wb]为

$$\phi = \frac{NI}{R_m} = \frac{NI}{l/(\mu A)} = \frac{\mu ANI}{l} \quad [\text{Wb}]$$

若计算拿掉铁心时的磁通 $\phi_0$  [Wb],则为

$$\phi_0 = \frac{\mu_0 ANI}{l} \quad [\text{Wb}]$$

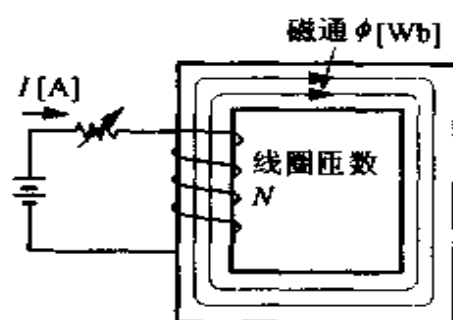


图 2.22 磁通势由  $I$  与  $N$  的乘积来决定

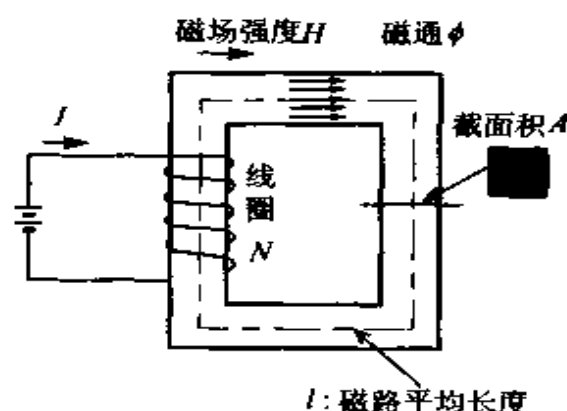


图 2.23 磁 阻

根据实验及理论推导,真空磁导率 $\mu_0$ 为 $4\pi \times 10^{-7}$  [Wb/Am],空气的磁导率与真空中的磁导率几乎相等。磁通 $\phi$ 与 $\phi_0$ 之比,即 $\mu$ 与 $\mu_0$ 之比称为物质(铁心)相对于真空中的相对磁导率。该相对磁导率用 $\mu_r$ 表示,其单位为无名数。表 2.1 表示不同物质的相对磁导率。

表 2.1 不同物质的相对磁导率 $\mu_r$

物质	$\mu_r$	物质	$\mu_r$	物质	$\mu_r$
银	0.999 973 6	空气	1.000 000 365	镍	300
铜	0.999 999	氧	1.000 179	硅钢板	6 000
氩	0.999 999	铝	1.000 214	坡莫合金	10 000
水	0.999 991 2	铂	1.000 293	纯铁	7 000

设一般物质的磁导率为 $\mu$ , 相对磁导率为 $\mu_r$ , 真空中的磁导率为 $\mu_0$ , 则

$$\mu = \mu_0 \mu_r = 4\pi \times 10^{-7} \mu_r$$

### 2.4.3 磁路计算

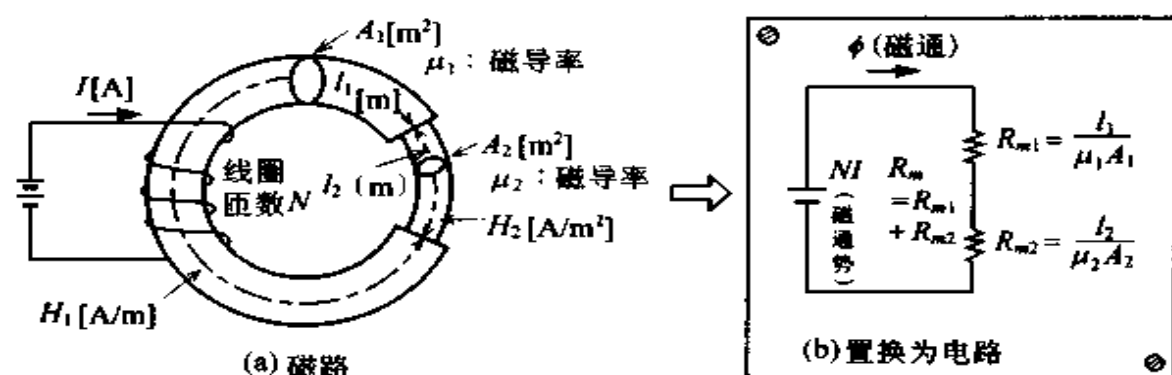


图 2.24 磁路计算法

根据图 2.24(b), 磁通  $\phi$  为

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{NI}{R_m} = \frac{NI}{R_{m1} + R_{m2}} \\ &= \frac{NI}{l_1/(\mu_1 A_1) + l_2/(\mu_2 A_2)} \quad [\text{Wb}] \end{aligned}$$

根据上式, 磁通势  $NI$  为

$$NI = \frac{\phi l_1}{\mu_1 A_1} + \frac{\phi l_2}{\mu_2 A_2} \quad [\text{A}]$$

磁通密度由于有  $B_1 = \phi/A_1$ 、 $B_2 = \phi/A_2$  的关系, 因此

$$NI = \frac{B_1 l_1}{\mu_1} + \frac{B_2 l_2}{\mu_2}$$

磁场强度由于有  $H_1 = B_1/\mu_1$ 、 $H_2 = B_2/\mu_2$  的关系, 因此

$$NI = H_1 l_1 + H_2 l_2$$

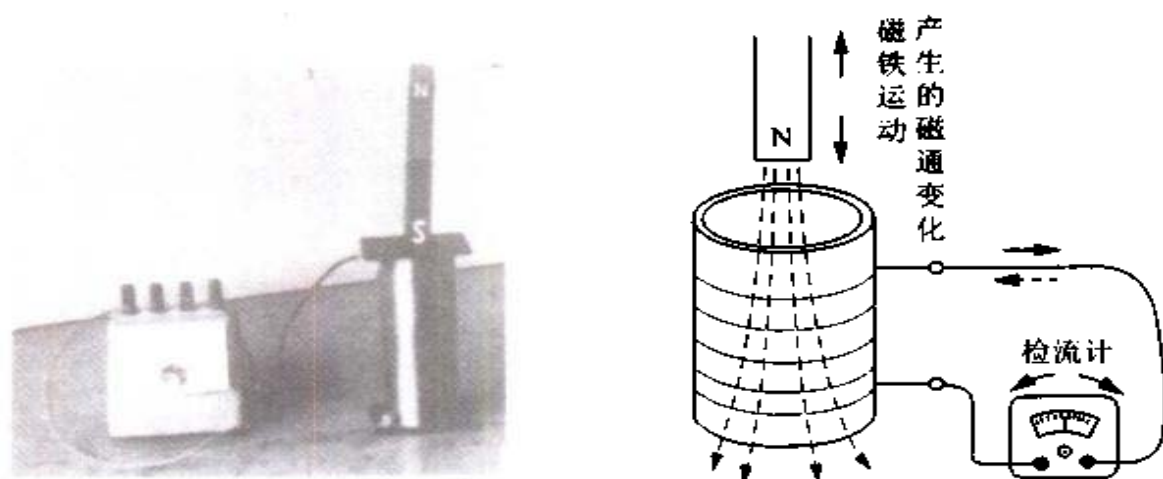
- **磁屏蔽** 由于强磁性体具有容易使磁通通过的性质, 因



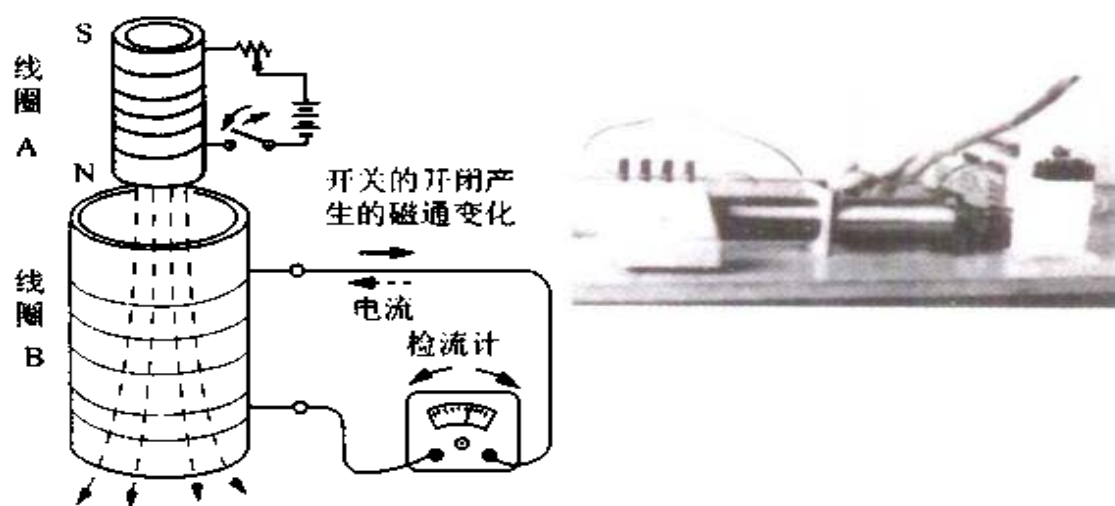
图 2.25 磁屏蔽

此其用于想增大磁通密度的地方或制造强磁铁等。如图 2.25 所示,若将用强磁性体构成的圆形铁心置于磁场中,则外部磁场对铁心内部几乎没有影响,即由于铁心磁导率大的原因,磁通集中通过铁心。这种导致不受磁场影响的现象称为磁屏蔽(或磁密封)。对于像电表及钟表等容易因外部磁场影响而产生误差的仪表,采用了磁屏蔽结构。

## 2.5 线圈产生电动势



(a) 利用磁铁产生电动势



(b) 利用电磁铁开关的开闭产生电动势

图 2.26 线圈中产生的电动势

为了得到电动势,可以用上述的电池,它是将物质进行化学变化时产生的能量转变为电能。另外,前面已经说过由电流而产

生磁场,那么由磁场能产生电动势吗?实际上,通过各种实验知道了会产生这种现象,这称为电磁感应现象,是发电机和变压器的重要原理。

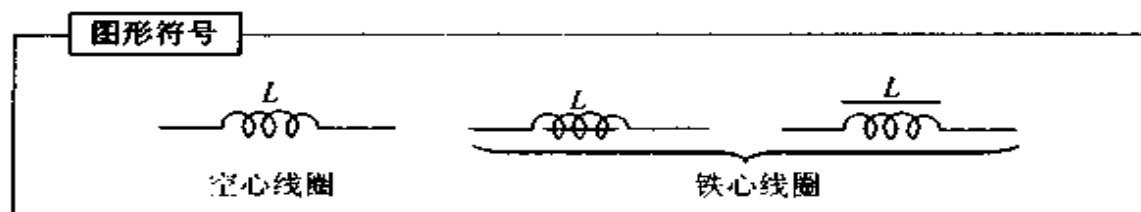


图 2.27 自感的图形符号

### 2.5.1 磁通变化在线圈中产生电动势

在图 2.26 的实验中,将磁铁快速插入线圈中,或快速从线圈中拔出,则可知有下列现象:

- (1) 在将磁铁插入或拔出的瞬间,检流计指针摆动。
- (2) 在将磁铁插入时及拔出时,指针的摆动方向相反。
- (3) 若使磁铁的运动加快,则指针摆动增大。
- (4) 若磁铁放在线圈内不动,则指针不摆动。

由上可知,当穿过线圈内的磁通增加或减少时,线圈中产生电动势,有电流流过。如图 2.26(b)所示,若开闭线圈 A 的开关,以代替磁铁运动,则由于穿过线圈 B 的磁通发生变化,因而与磁铁的情况一样,检流计的指针发生摆动。

这样因感应而产生电动势的现象称为**电磁感应**,该电动势称为**感应电动势**,流过的电流称为**感应电流**。

### 2.5.2 感应电动势的方向与大小

(a) **确定感应电动势方向的楞次定律** 如图 2.28 所示,在穿过线圈的磁通  $\Phi$  增加时[图(a)],感应电动势  $e$  的方向使磁通减少,另外在穿过线圈的磁通  $\Phi$  减少时[图(b)],感应电动势  $e$  的方向使磁通增加,即

感应电动势使感应电流流过所产生的磁通方向总是阻碍产生感应电动势的原来的磁通变化。

这称为楞次定律。

(b) 确定感应电动势大小的法拉第定律 在图 2.26 中,若磁铁插进拔出加快,则检流计指针的摆动增大。另外还知道,若磁铁磁性增强,或流过线圈的电流增大,或线圈匝数增加,指针的摆动也增大。因而

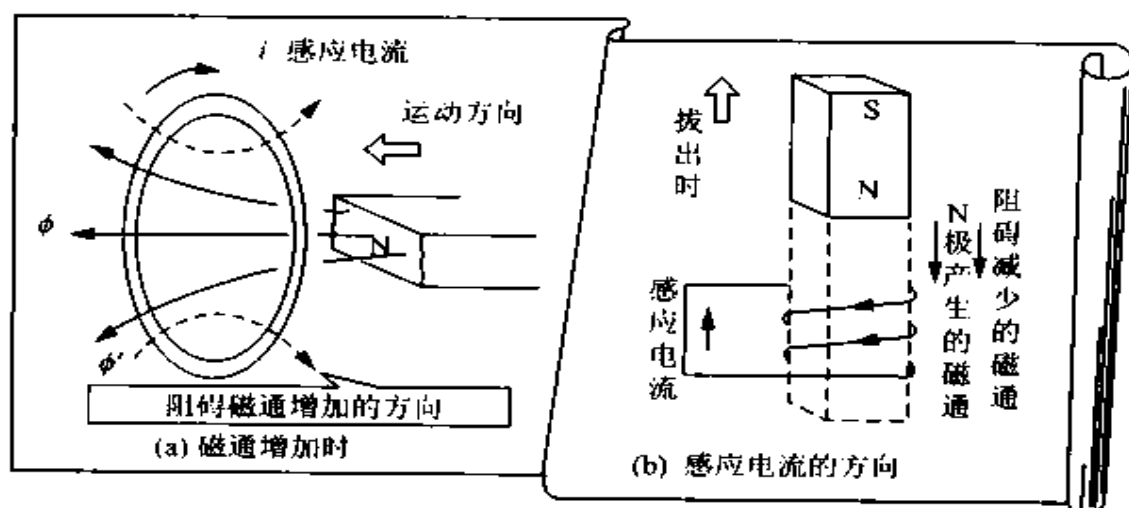


图 2.28 感应电动势的方向

感应电动势的大小与穿过线圈的磁通变化率成正比

这称为法拉第定律。

当 1 匝线圈中的磁通以每秒钟 1 Wb 的比例变化时,产生的感应电动势的大小为 1 V。

因而,若 1 匝线圈中的磁通在  $\Delta t$  秒钟变化  $\Delta\phi$  [Wb],则单位时间的磁通变化量为  $\Delta\phi/\Delta t$ ,因此感应电动势的大小  $e$  [V] 为

$$e = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad [\text{V}]$$

如图 2.29 所示,当线圈为  $N$  匝时,则感应电动势  $e$  为 1 匝的  $N$  倍。

$$e = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad [\text{V}]$$

感应电动势的产生是根据楞次定律及法拉第定律综合而产生的现象,因此电动势  $e$  表示如下(式中负号意味着阻碍磁通变化的方向):

$$e = - \frac{N\Delta\phi}{\Delta t} \quad [\text{V}]$$

**例 2.29** 当对于 100 匝的线圈在 0.2 秒钟有 0.3Wb 磁通量的变化时,根据电磁感应,该线圈产生多大的电动势?

解答:根据  $e = N(\Delta\phi/\Delta t)$ , 电动势  $e$  为

$$e = 100 \times \frac{0.3}{0.2} = 150\text{V}$$

——→ 电动势为 150V

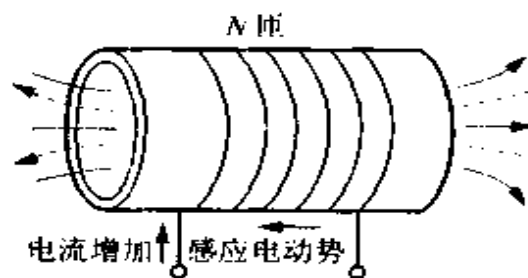


图 2.29 因电流变化而产生感应电动势

### 2.5.3 线圈中流过电流也产生电压

在图 2.30 中,当接通开关  $S$ ,则线圈中有箭头所示方向的电流流过,在线圈内部有如图所示向右的磁通  $\phi$  产生。这种情况下,根据楞次定律,在线圈中会产生一个作用,想要使电流流过以产生向左的磁通  $\phi'$ ,来阻碍  $\phi$  的增加。当打开开关  $S$  时,则感应产生的电流生成向左的磁通  $\phi'$ ,以阻碍  $\phi$  的减少。这样的线圈自

身产生感应电动势的现象称为自感作用。

在线圈中,电流的变化越大,则磁通的变化也越大,因此线圈产生的感应电动势  $e$  为

$$e = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [\text{V}]$$

根据上式,即使电流变化率  $\Delta I/\Delta t$  相同,但若  $L$  较大,则感应电动势也较大。 $L$  值表示线圈的自感应作用大小,称为自感,它随线圈的形状与匝数而变。自感  $L$  的单位用亨利(单位符号为 H)表示。

当1秒钟电流变化1A时,若线圈感应电动势为1V,则自感为1H。

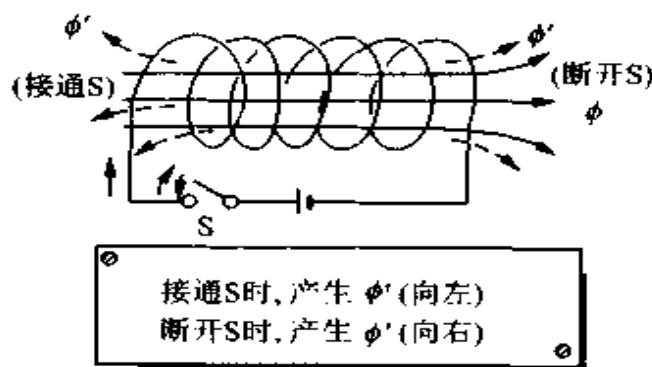


图 2.30 线圈的自感



## 2.6 直流电动机的旋转原理

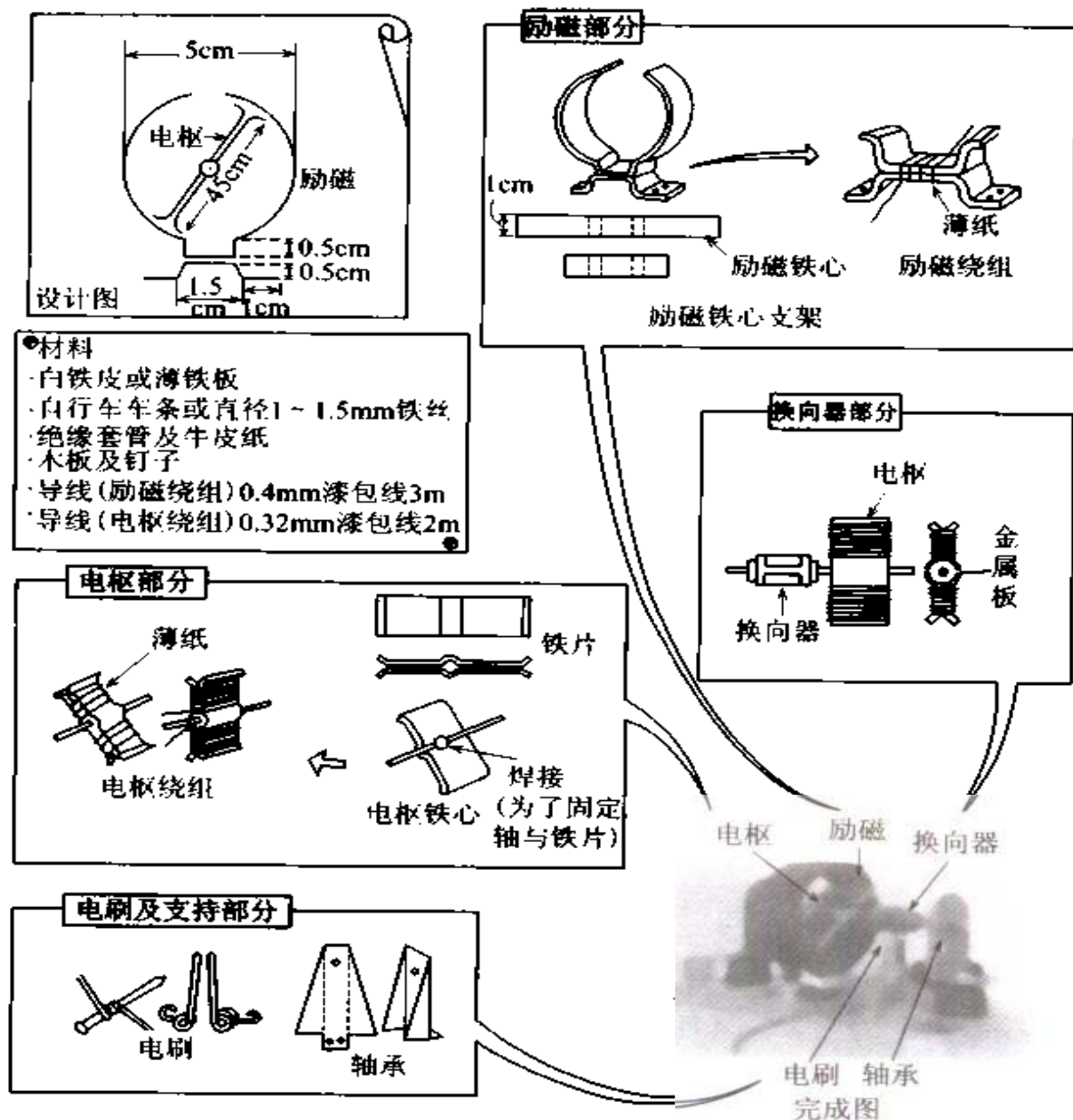


图 2.31 直流电动机的制造

电动机为什么会旋转？图 2.31 为利用废物制造的电动机。该电动机能旋转也许谁都感到惊讶。但是仔细想一想，根据前述的理论就很容易理解了。

### 2.6.1 磁场与电流的组合

如图 2.32(a) 所示，在电磁铁产生的磁场中吊有线圈，当开关 S 保持打开状态时，线圈笔直向下，而一旦将开关 S 闭合，有电流  $I$  流过，则受到箭头方向的力，向该方向偏摆。若改变电池极性，改变电流方向，则线圈向反方向偏摆。图(b)的照片所示为实验装置。这样在图 2.32 中，一旦闭合开关 S，置于磁场中的导体有电流流过，则由于磁场与电流的相互作用，对导体有力的作用。这样的力称为电磁力。

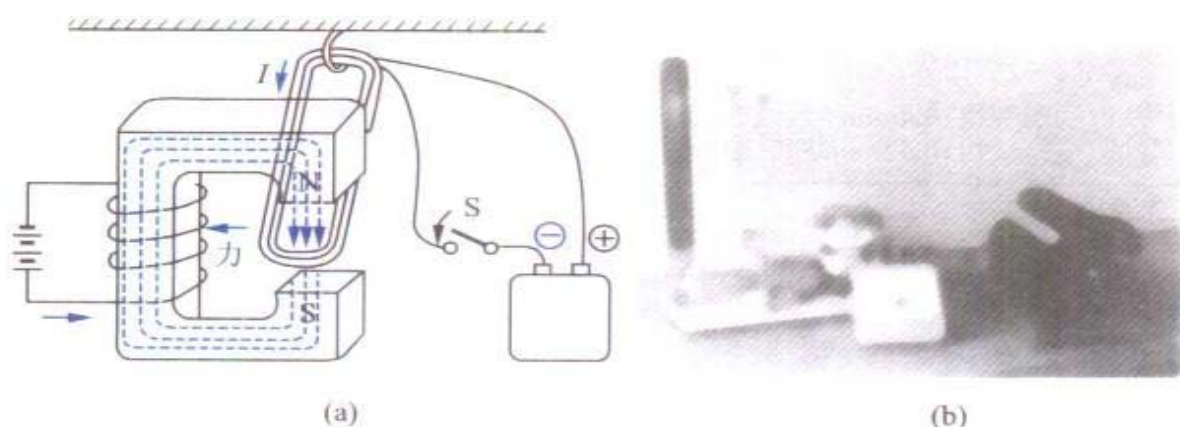


图 2.32 电磁力的实验

### 2.6.2 电磁力的方向

图 2.33(a) 所示为导体中未流过电流时仅由磁铁产生的磁力线的状态。另外，当没有磁铁而导体中有电流流过时的磁力线分布，则根据前述右螺旋定则如图(b)所示。因此，当图(a)及(b)同时产生时，导体上部的磁铁磁力线与导体磁力线相叠加，而下部的磁力线相互抵消而减弱。磁力线好像有弹性，对导体作用了向箭头方向的力  $F$ 。另外，若导体的电流方向反向，则力  $F$  也反向。

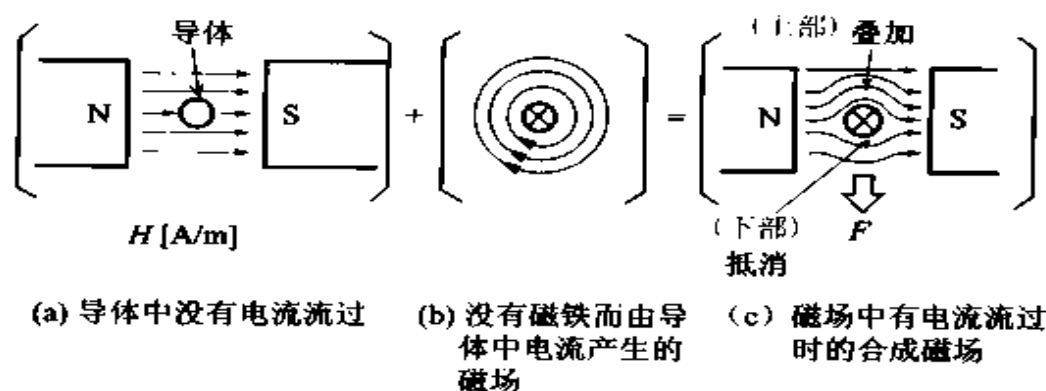


图 2.33 电磁力的方向

为了简单理解该电磁力的方向,可以用弗莱明左手定则。如图 2.34 所示,将左手的大拇指、食指及中指伸直,互相成直角,若将食指指向磁通方向,将中指指向电流方向,则大拇指方向与力的方向一致。

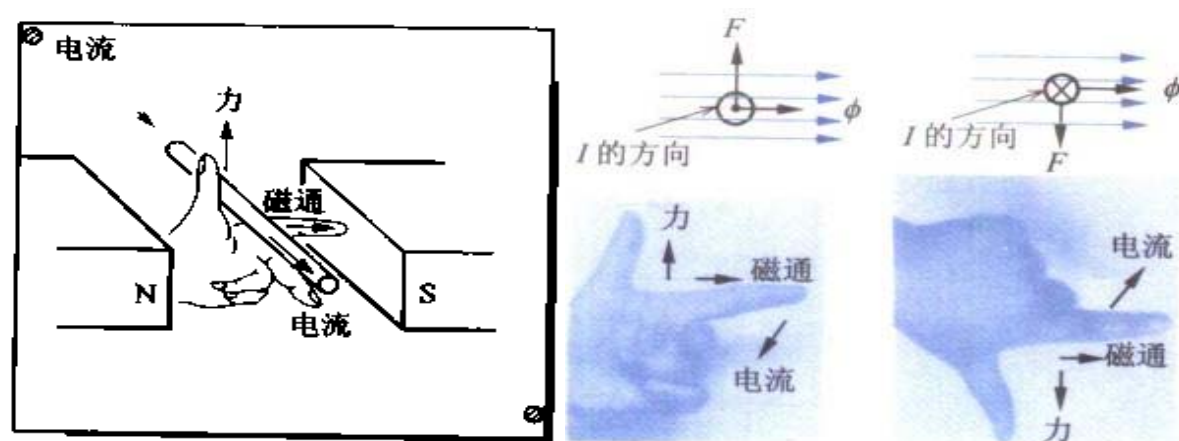


图 2.34 弗莱明左手定则

### 2.6.3 电磁力的大小

如图 2.35 所示,在均匀磁场  $B$  [T] 中,与磁场的垂直方向放置导体  $l$  [m],当导体中通过电流  $I$  [A] 时,产生的电磁力  $F$  为

$$F = B l I \quad [\text{N}]$$

当磁场的方向与导体(电流)的方向不是直角,而是有  $\theta$  倾斜

角时,电磁力  $F$  为

$$F = B l \sin \theta \quad [\text{N}]$$

• 作用于矩形线圈的力 如图 2.36 所示,在磁通密度为  $B[\text{T}]$  的均匀磁场中,放置长  $a[\text{m}]$ 、宽  $b[\text{m}]$  的  $N$  匝矩形线圈,使其平面与磁场平行。当线圈中流过电流  $I[\text{A}]$  时,求作用于线圈的力。

作用于线圈的边①—②及③—④的作用力  $F[\text{N}]$  为

$$F = IBaN \quad [\text{N}]$$



图 2.35

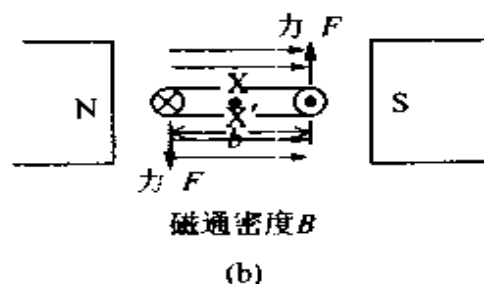
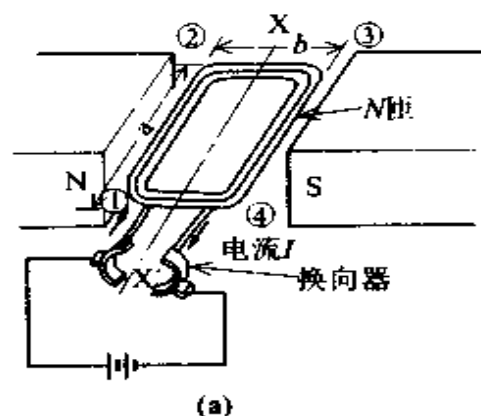


图 2.36 作用于矩形线圈的力

力  $F$  的方向如图 2.36(b) 所示, 以相互相反的方向作用于线圈两边, 因此形成以轴  $XX'$  为中心的旋转力。该旋转力即力矩  $T$  用下式表示:

$$T = 2 \left( F \frac{b}{2} \right) = 2IBaN \frac{b}{2} = IBabN \quad [\text{N} \cdot \text{m}]$$

但是, 为了使电动机旋转, 线圈在以轴为中心旋转半圈后, 电流要反向, 到达那个位置时作用力也反过来。因此, 为了能够使线圈电流始终在一定方向, 要加上换向器(又称整流子)[图 2.36(a)]。图 2.31 中给出换向器的构造。

#### 2.6.4 磁电式仪表的原理

图 2.37 为仪表的原理, 若可动线圈中流过电流  $I$  [A], 则线圈在磁场中的部分产生电磁力, 对可动线圈产生驱动力矩而使其旋转。于是游丝弹簧卷紧, 产生使其恢复原形的控制力矩。在电流  $I$  产生的电磁力与游丝弹簧的反作用力相等的位置处, 指针停止。

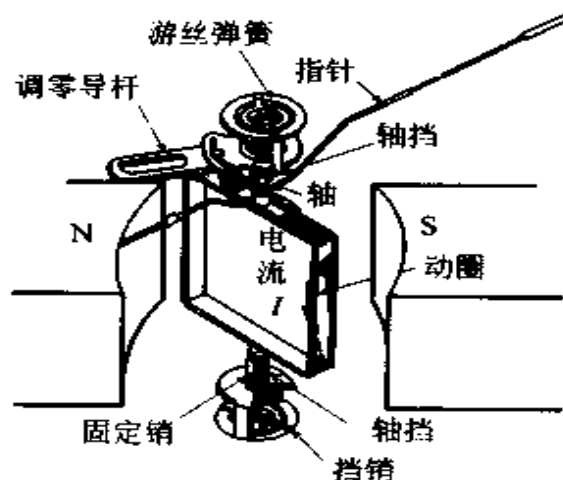


图 2.37 磁电式仪表的原理

## 2.7 阿拉戈圆盘

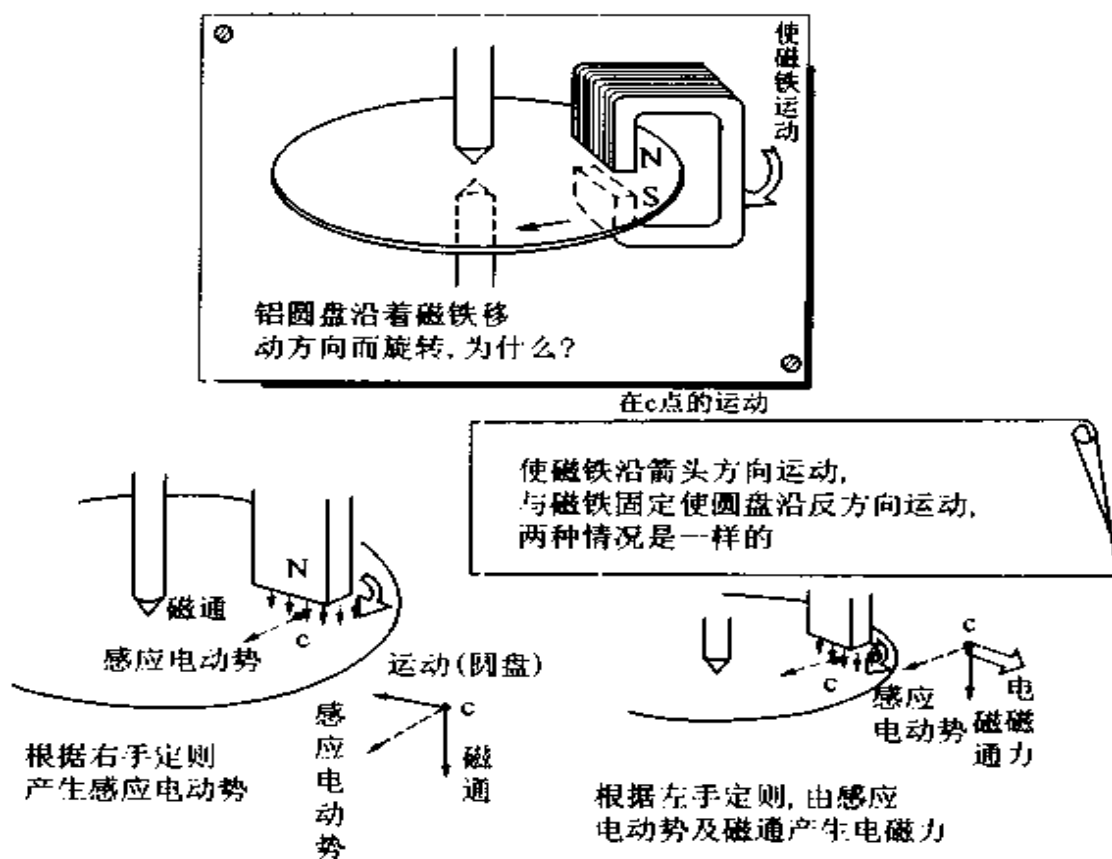


图 2.38 圆盘旋转的原理

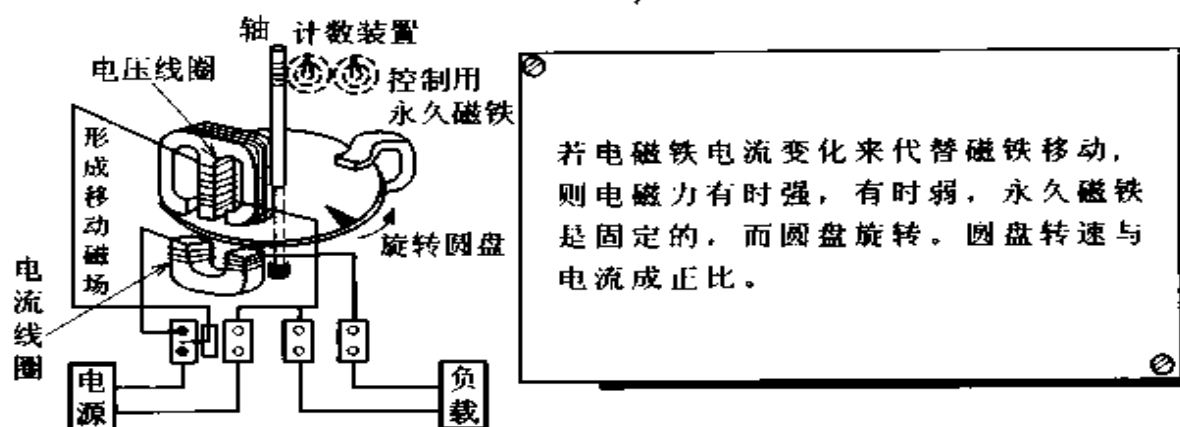


图 2.39 电度表的结构

在前一章已经知道,在磁场中放置流过电流的导线,会产生所谓电磁力。但是,在使置于磁场中的导体产生运动时,会产生什么现象?在本章中,将讨论这一问题。

### 2.7.1 导体在磁场中移动会产生电动势

若用图 2.40 所示的装置使线圈如箭头所示运动,则可知有下列的现象。

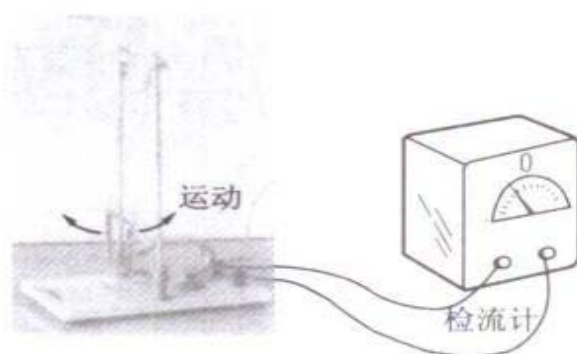


图 2.40 感应电动势的产生

- (1) 线圈一运动,检流计的指针就偏摆。
- (2) 线圈从右向左运动时与相反方向运动时,指针的偏摆方向也相反。

(3) 线圈的运动速度越快, 指针的偏摆也越大。

由上可知, 导体一旦在磁场中运动, 在导体中就产生感应电动势。因而, 产生的电动势方向因切割磁通的方向而异, 电动势大小因切割磁通的速度而异。

### 2.7.2 感应电动势的方向

为了很方便地知道因导体切割磁通而产生的电动势的方向, 有弗莱明右手定则。图 2.41 所示为它们的关系。

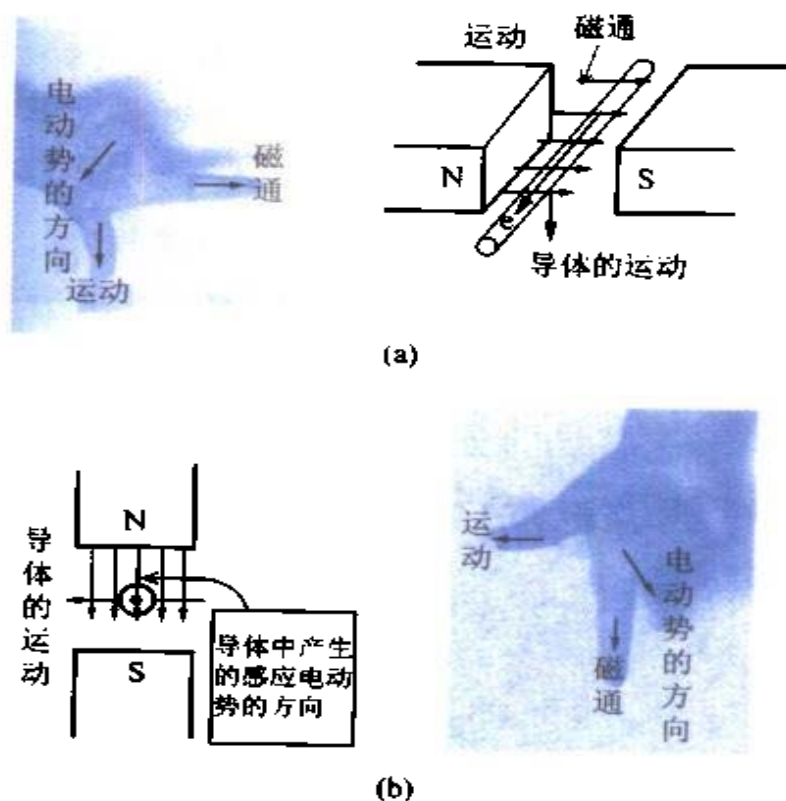


图 2.41 表示运动、磁通及电动势关系的右手定则

将右手的大拇指、食指及中指伸直, 互相成直角, 若将食指指向磁通方向, 将大拇指指向导体运动方向, 则中指的方向表示产生的电动势方向。



### 2.7.3 产生的电动势大小

如图 2.42 所示,在具有磁通密度  $B$  的均匀磁场内,若使直线导体  $ad$  向右运动,则穿过线圈的磁通增加。设导体的运动速度为  $v$  [m/s], 则  $\Delta t$  秒钟导体移动的距离即  $aa'$  [m] 为

$$aa' = v\Delta t$$

磁通的变化量  $\Delta\phi$  [Wb] 为

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \text{磁通密度 } B \times (\text{面积 } aa'd'd) \\ &= Blv\Delta t\end{aligned}$$

由于感应电动势  $e$  为单位时间中磁通变化量而产生的,因此

$$e = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{Blv\Delta t}{\Delta t} = Blv \quad [\text{V}]$$

若如图 2.42(c) 所示,线圈相对于磁通有倾斜角  $\theta$ , 则以速度  $v$  [m/s] 运动时,垂直切割磁通的速度  $v'$  为  $v\sin\theta$ , 因此

$$e = Blv' = Blv\sin\theta \quad [\text{V}]$$

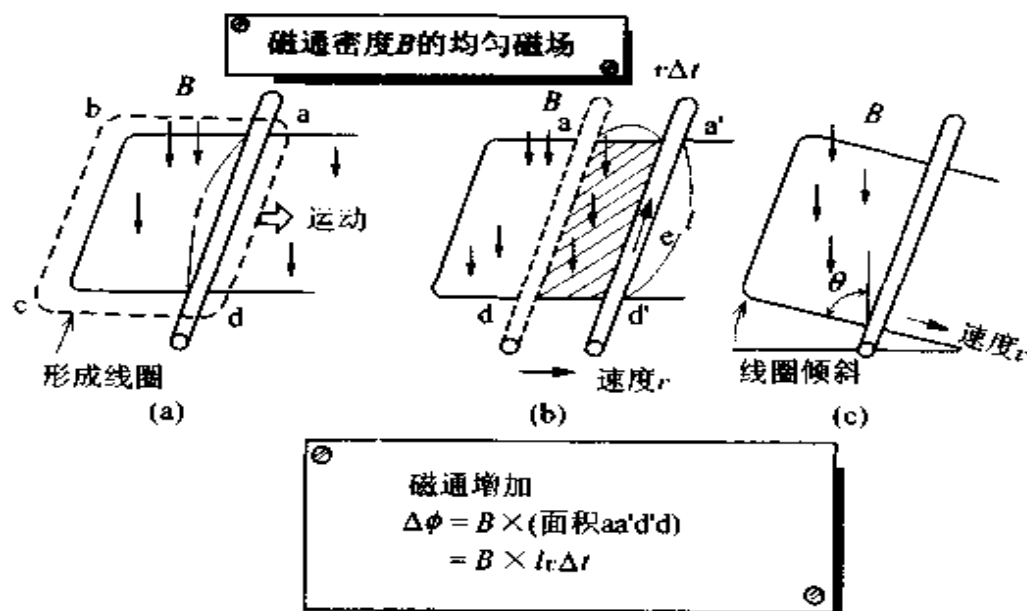


图 2.42 因导体运动而产生的感应电动势大小

### 2.7.4 右手定则的应用

如前所述,若导体切割磁通,则产生感应电动势,其方向根据右手定则可知。因此,若采用旋转运动始终使导体切割磁通,则应该能够很容易地连续产生感应电动势。图 2.43 所示为直流发电机的原理图。若对前章所述的直流电动机的线圈用外力使其旋转,则在线圈的  $ab$  及  $cd$  边所产生的电动势方向如箭头所示。由于线圈旋转  $180^\circ$  时,感应电动势的方向反转,因此通过换向器(图中的  $C_1$  及  $C_2$ )使得在外部得到一定方向的电压,这就是直流发电机。

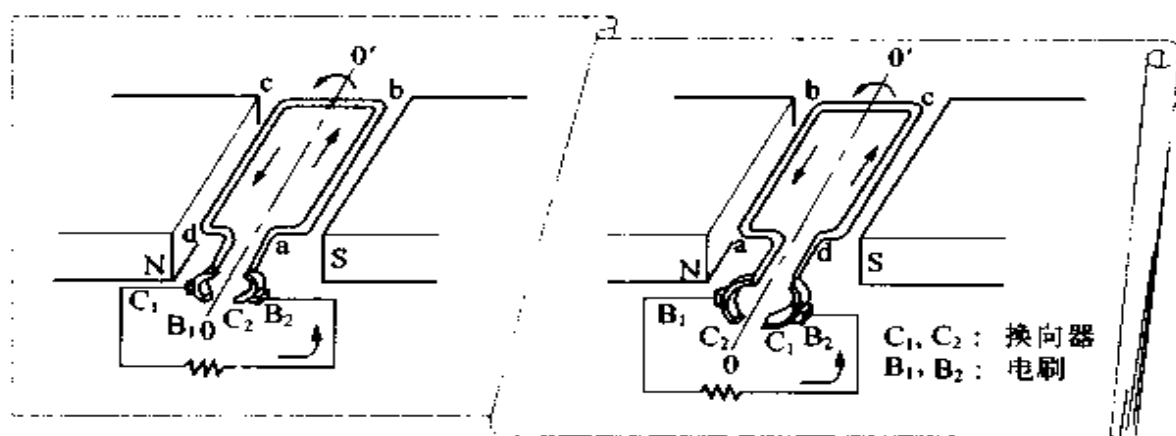


图 2.43 直流发电机的原理

### 2.7.5 阿拉戈圆盘及应用

如图 2.38 所示,若沿着用尖针支承的圆盘边缘使磁铁运动,则圆盘像被磁铁吸引那样而旋转起来,这一现象被法国的阿拉戈发现,所以人称阿拉戈圆盘。

阿拉戈圆盘的原理被应用于交流电度表及感应电动机。但是在它们当中,不是让具有 N 极及 S 极的永久磁铁运动,而是利用线圈的组合来代替磁铁,产生像磁铁旋转那样的移动磁场(也称为旋转磁场),将该旋转磁场应用于电度表或电动机。图 2.39 所示为简单的电度表的结构。

## 2.8 作用于平行导体的力

大家都感觉到了,在接通电热器开关的时候,电热丝发红的一瞬间,会发出“嘭”的声音。这种现象在大型变压器中也会发生。这种振动声音是由于线圈中流过电流所致。

### 2.8.1 电流流过平行导体会产生力

如图 2.44(a) 所示,将两条铜导线并排排列,若在其中流过相同方向的电流,则两条导线互相受到吸引力的作用。其理由如下所示,即根据图 2.44(b),可得到图 2.45 的说明。在图 2.44(c) 中,流过两条导体的电流方向相反,则产生排斥力。

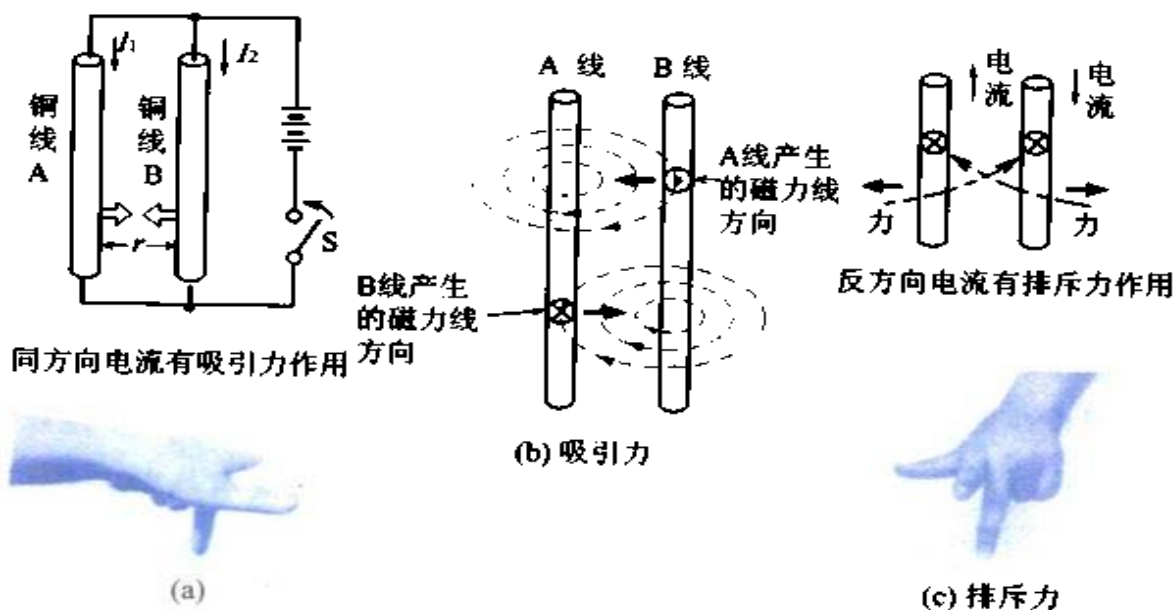


图 2.44 作用于平行导体的力

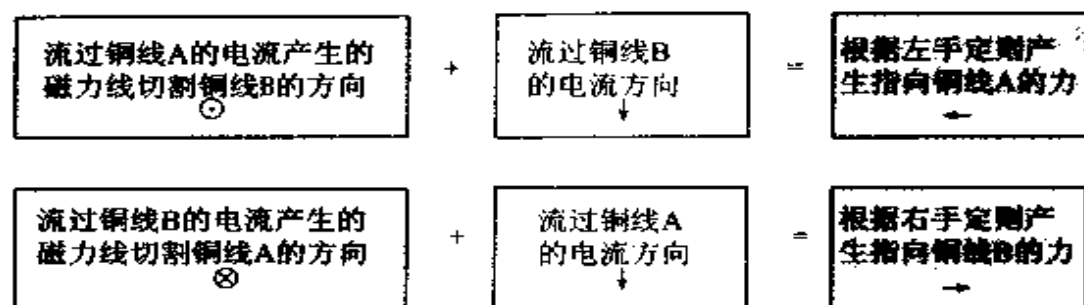


图 2.45 图 2.44(a) 的吸引力的说明

### 2.8.2 作用于平行导体的电磁力

在图 2.44(a) 中, 由于铜线 A 的电流  $I_1$  [A] 在铜线 B 的位置产生的磁场  $H$  [A/m] 为

$$H = \frac{I_1}{2\pi r}$$

( $r$ : 铜线 A 与铜线 B 的距离)

该磁场的磁通密度  $B$  [T] 为

$$B = 4\pi \times 10^{-7} \times H = 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{I_1}{2\pi r} = 2 \times 10^{-7} \frac{I_1}{r}$$

因而, 作用于 1m 铜线 B 的电磁力  $F$  [N] 为

$$\begin{aligned} F &= BI_2 l = 2 \times 10^{-7} \times \frac{I_1}{r} \times I_2 \times 1 \\ &= \frac{2I_1 I_2}{r} \times 10^{-7} \text{ [N]} \end{aligned}$$

由铜线 B 的磁场作用于铜线 A 的电磁力的大小也完全相同。

### 2.8.3 为什么会产生线圈的振动音

所谓平行导线, 不仅是直线导体, 像电热器的螺旋状镍铬电热丝或变压器的绕组也可以认为是一

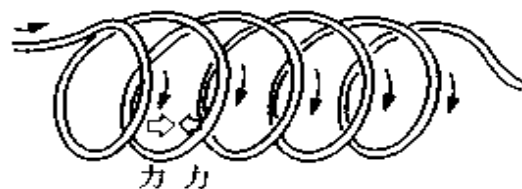


图 2.46 流过线圈的电流

种平行导体。

如图 2.46 所示,若线圈中流过电流,则观察流过线圈的电流的每一小部分,都是同方向流的电流。因而,电流同方向流过就会互相吸引,就产生一个力使整个线圈缩短。而一般家庭中使用的电流是交流电流,大小和方向发生周期变化,因此从正变为负(或负变为正)时的电流为零。所以,线圈中流过电流而产生的吸引力就没有了。若再流过电流,则吸引现象又产生,这就是产生振动音的原因。而电热器--旦流过电流而温度升高,螺旋镍铬电热丝膨胀,失去了作为弹簧的弹性,就停止了哼的声音。

## 2.9 变压器的原理

变压器的结构



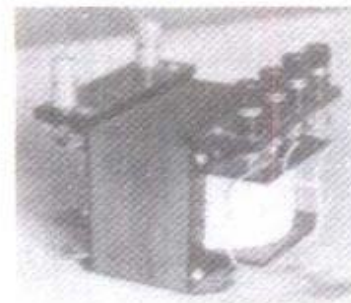
铁心 ↓



绕组 ↓



装配 ↓



成品

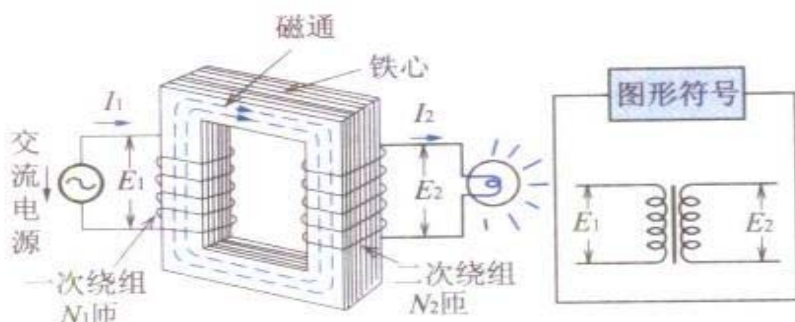
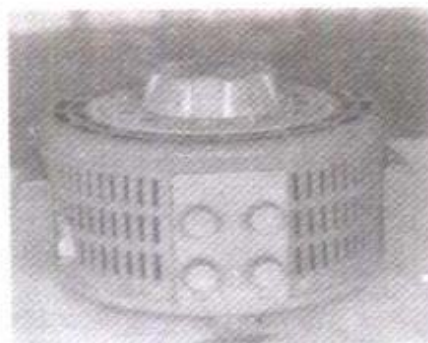
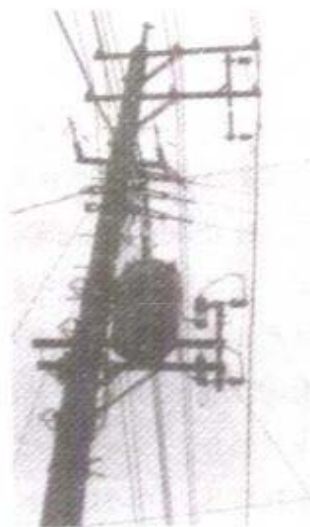


图 2.48 变压器的原理图



(a) 调压变压器



(b) 杆上变压器

图 2.47 变压器的安装工序

图 2.49 实际的变压器

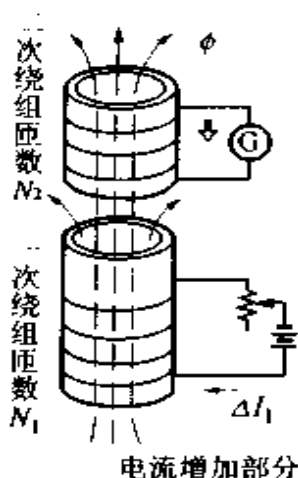


图 2.50 互感作用

### 2.9.1 相邻绕组中产生感应电动势

如图 2.50 所示,若将两个绕组互相结合近,则流过其中一次绕组的电流所产生的磁通与另一个二次绕组交链。若使流过一次绕组的电流变化,则与二次绕组交链的磁通也变化,因此在二次绕组中,由于电磁感应产生感应电动势,其方向为阻碍磁通变化。若在二次绕组有电流流过,并使该电流变化,则在一次绕组产生同样的现象,产生感应电动势。这样,由于相互在绕组中流过电流的变化而产生感应电动势的现象称为互感作用。

现设流过一次绕组的电流在  $\Delta t$  秒钟变化  $\Delta I$  [A], 与二次绕组交链的磁通变化了  $\Delta \phi$  [Wb], 则二次绕组感应的感应电动势  $e_2$  [V] 为

$$e_2 = -N_2 \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad [\text{V}]$$

式中,  $N_2$  为二次绕组的匝数。因而, 二次绕组产生的感应电动势  $e_2$  [V] 与电流的变化比例  $\Delta I_1 / \Delta t$  成正比, 设比例常数为  $M$ , 则  $e_2$  为

$$e_2 = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad [\text{V}]$$

式中,  $M$  称为互感(互感系数), 是取决于绕组的大小、形状、相互位置、有无铁心的一个常数。单位用亨利[H]表示。

根据上两式可得

$$N_2 \Delta \phi = M \Delta I_1$$

现设流过一次绕组的电流为  $I_1$  [A], 与二次绕组交链的磁通为  $\phi$  [Wb], 则电流与磁通的变化分别为  $I_1$  及  $\phi$ , 因此

$$N_2 \phi = M I_1$$

由上式可得

$$M = \frac{N_2 \phi}{I_1}$$

当流过一次绕组的电流为  $I_1$  [A] 时,若知道与二次绕组交链的磁通,则可求出互感  $M$  [H]。

### 2.9.2 变压器的结构

如图 2.51 所示,若将两个绕组靠近,并使一次绕组中流过的电流变化,则由于互感作用,在电流变化期间在二次绕组产生感应电动势。因而,若一次绕组流过的电流是大小及方向不断变化的交流,就在二次绕组感应与电流的变化相应的电动势。在变压器中,将两个绕组绕在同一个铁心上,若一个绕组加上交流电压,由于铁心是导磁材料构成,因此磁通变化交链至另一绕组,在另一绕组高效率地产生感应电动势。

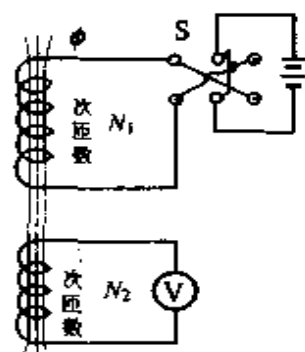


图 2.51 变压器的原理

如图 2.52 所示,在变压器中,设一次绕组所加电压为  $E_1$  [V],二次绕组产生的电压为  $E_2$  [V],一次绕组的匝数为  $N_1$  匝,二次绕组的匝数为  $N_2$ ,则  $E_1$  与  $E_2$  的大小正比于两绕组的匝数。

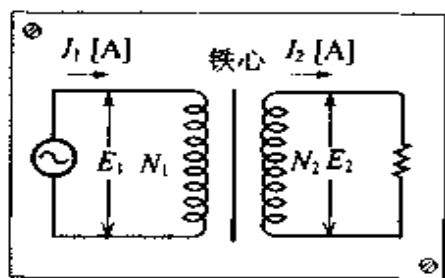


图 2.52 变压器的基本电路

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

所以 
$$E_2 = \frac{N_2}{N_1} E_1$$

另外,不仅电压,电流也按一定比例变化。设一次绕组流过的电流为  $I_1$  [A],二次绕组流过的电流为  $I_2$  [A],

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

则电流与匝数成反比,即



所以 
$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1$$

这样,变压器通过适当选择匝数比,不仅可以使电压大小变化,而且还可以使流过的电流大小变化。因此,可以像收音机用变压器那样,从二次绕组抽出几个输出端,得到加热器电压或高电压。但是如果认为,因为电压电流变化,则功率也变化,那就错了。供给一次绕组的功率与二次绕组产生的功率是几乎相同的(实际上变压器内部有少量的功率损耗)。

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

所以 
$$E_1 I_1 = E_2 I_2$$

$E_1 I_1$  及  $E_2 I_2$  的单位为伏安[VA]。由变压器的使用电压及电流决定,二次绕组侧的电压与电流之积称为变压器的额定容量。

### 2.9.3 变压器铁心用薄硅钢片叠成

仔细来看绕有变压器绕组的铁心,发现它由薄硅钢片层叠而构成(参见图2.47)。其理由用阿拉戈圆盘可知,若在铝盘中有磁通变化,则圆盘中产生电流。由于磁通变化而产生的感应电动势,除了绕组以外,在铁心及铜板中也产生电流流过。该电流称为涡流。若涡流流过铁心及铜板等,则由于铁心或铜板的电阻而发热,导致电气设备的温度上升,常常造成功率损耗甚至烧坏。

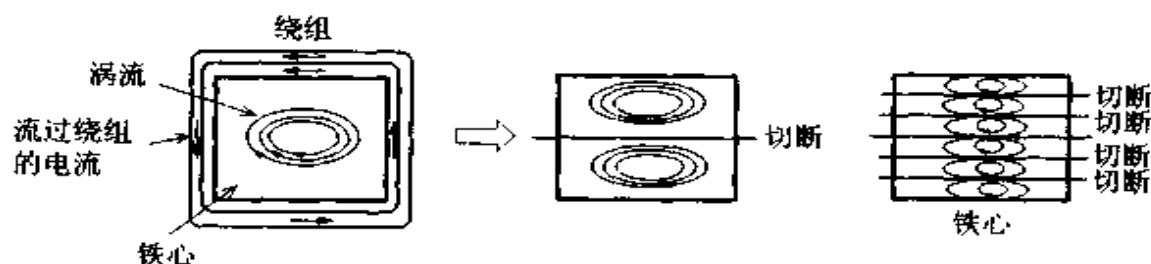


图 2.53 防止涡流的方法

为了防止这种现象,使该涡流难以流动,可将铁心切成薄片,片与片之间进行绝缘,构成层叠铁心。再在铁心材料中加入少量的硅(Si),制成硅钢片,采用这种硅钢片,磁通容易通过,但电阻增大,使涡流难以流动。硅钢片常用作电动机及变压器的铁心材料。

## 2.10 磁性材料的基本性质

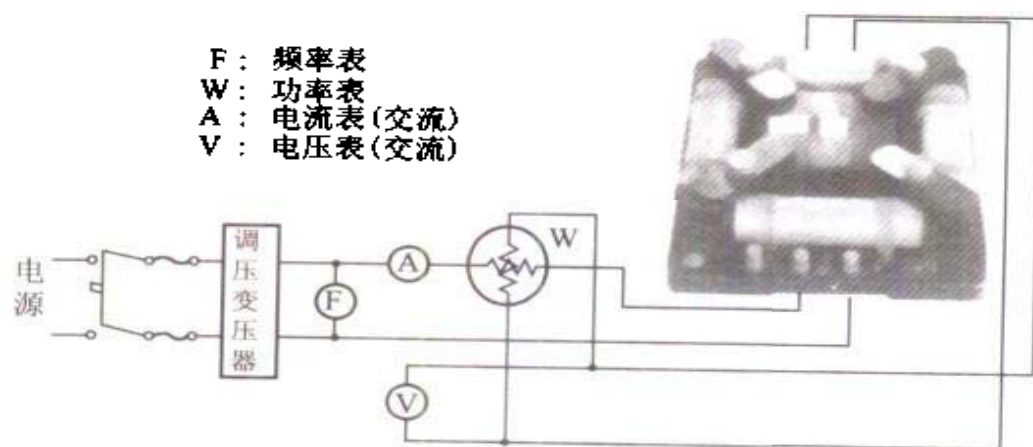


图 2.54 利用爱泼斯坦装置测量铁损



图 2.55 磁滞回线

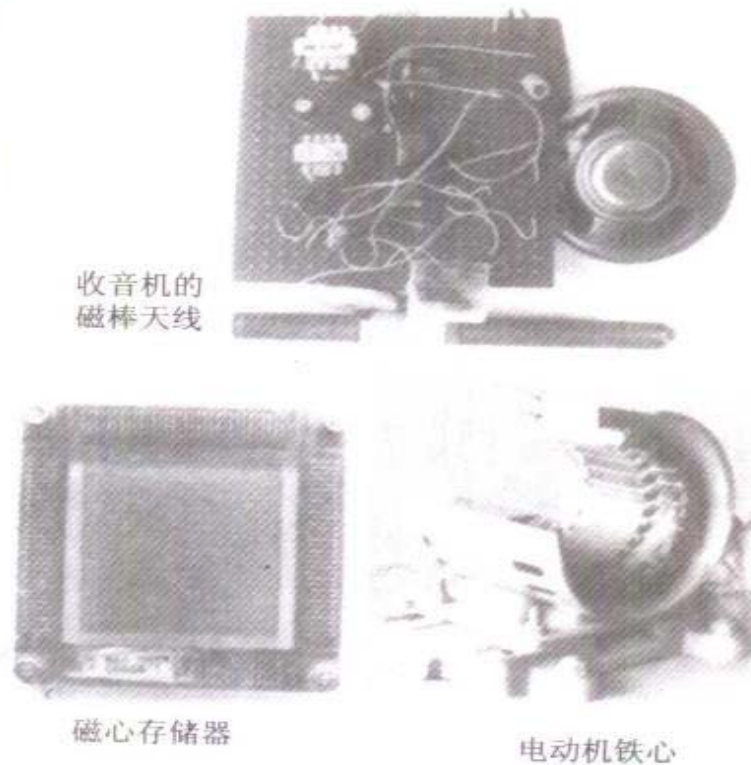


图 2.56 各种磁性材料

磁性材料所用的主要材料是强磁性体,即铁、镍、钴及其合金,其中因成分多少有些不同而有许多种。

磁性材料根据其功能可分为磁心材料、磁铁材料及特殊磁性材料。磁心材料用于电气设备及高频领域,磁铁材料一般用于测量仪表。而特殊磁性材料用于计算机用电子元器件或磁存储元件。

工业用磁性材料的一般条件如下所述:

- (1) 具有与其功能相应的特殊的磁性能。
- (2) 机械强度高,容易进行加工及热处理。
- (3) 价格低。特别是对于大量使用的电动机、发电机、变压器的磁性材料,这一点很重要。

### 2.10.1 磁性材料的磁特性

(a) 磁化曲线( $B-H$  曲线) 如图 2.57(a)所示,当线圈内部是空心时,电流越大,磁场越强。与此成比例,磁通也增加,磁通密度也增加。但是,如图(b)所示,对未磁化的铁等磁性体进行磁化时,即使磁场强度  $H$  增加,磁化到一定程度不再增加,磁通密度停止增加,显现出饱和的性质,表示该关系的曲线称为磁化曲线或  $B-H$  曲线。图(c)的  $oa$  曲线即为  $B-H$  曲线。

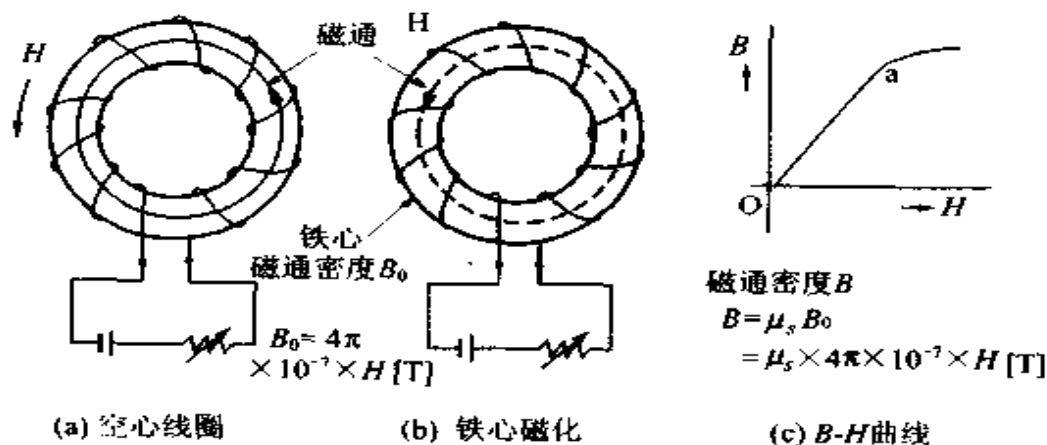


图 2.57  $B-H$  曲线的实验

**(b) 磁滞回线** 将磁化曲线( $B-H$ 曲线)的范围再扩大,用图 2.58(a)的电路使电流增加(电流与磁场强度  $H$  成正比),则磁通密度的变化如图(b)的  $oa$  所示。接着若减少电流,则如  $ab$  所示减少,而决不通过原来的  $oa$ 。若再使电池反向连接,使电流反向增减,则按  $bcde$  变化。再将电池极性恢复为原来的方向使电流增加,则沿  $efa$  回到  $a$ 。这样得到的闭合曲线称为**磁滞回线**。不沿着同一条曲线变化的现象称为**磁滞现象**, $ob$  的大小称为**剩磁**,是表示电流为零但仍有剩余磁场的现象。 $oc$  的大小称为**矫顽力**,是表示为了消除剩余磁场必须反向流过多大的电流。

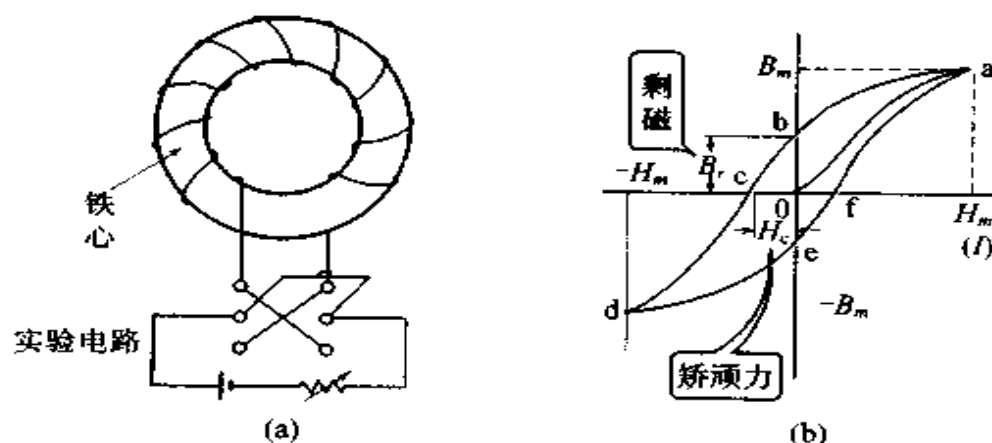


图 2.58 磁滞回线

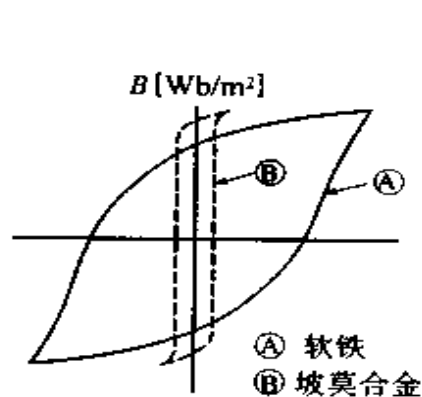


图 2.59 磁滞损耗

**(c) 磁滞损耗** 若线圈中流过交流电,则电流方向发生周期性变化,在其一个周期内在铁心中作为热量消耗掉的电功率正好等于磁滞回线内的面积,导致铁心温度上升。该功率损耗称为**磁滞损耗**。

图 2.59 所示为软铁及坡莫合金的磁滞损耗。

### 2.10.2 磁性材料的种类

• **磁心材料** 磁心材料不仅磁滞损耗及涡流损耗必须要尽可能小,而且必须满足下列的条件:

- (1) 导磁率大,而且要尽可能稳定。
- (2) 饱和磁通密度大。
- (3) 矫顽力及剩磁小,即磁滞损耗小。
- (4) 电阻率大。
- (5) 机械及电磁性能稳定。

• **硅钢片** 是使用最多的磁心材料。旋转电机用及变压器那样静止电气设备用的硅钢片,其含硅量略有不同,但表面都涂覆有绝缘用清漆等物质。

• **存储作用** 由于磁性体具有磁滞特性,在电流方向为正,加上磁场强度为  $+H_m$  之后,使电流为零,则产生剩磁  $+B_r$ 。另外,使电流反向流过之后再使其为零,则产生反向的剩磁  $-B_r$ 。这种现象能够在电流没有时通过剩磁记忆刚才电流流动的方向。该存储性能用于电子计算机等。图 2.60 所示为用作存储元件的磁性体的磁滞回线之一例。

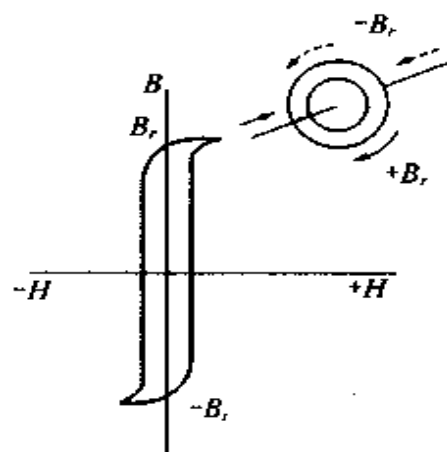


图 2.60 磁性体及存储作用

• **铁氧体** 与日常使用的陶瓷属于同一类,将铁的氧化物加以烧结而成黑色的陶瓷体,再在此基础上加上各种金属氧化物而制成。其用途非常广泛,大量用于晶体管收音机的天线线圈磁心、收音机用中频变压器、磁带录音机的磁带、冰箱门等。

## 本章小结

### 磁的性质

N 极与 S 极吸引, N 极与 N 极或 S 极与 S 极排斥。异性相吸, 同性相斥。

### 库仑定律

磁力与磁场的关系是磁力与两个磁极强度的乘积成正比, 与两磁极间的距离平方成反比:

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [\text{N}]$$

$$\left( \text{真空中的场合} \quad F = 6.33 \times 10^4 \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [\text{N}] \right)$$

### 地磁场三要素

磁偏角、磁倾角与水平分量。

### 右螺旋定则

当以右螺旋旋转时, 若使螺旋的前进方向为电流方向, 则螺旋旋转方向相当于磁场方向。另外, 若将磁场方向作为螺旋前进方向, 则螺旋旋转方向为电流方向。

### 直线导体产生的磁场大小

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad [\text{A/m}]$$

### 电磁感应

若与线圈交链的磁通随时间而变化, 则  $N$  匝线圈产生的感应电动势为 (楞次定律、法拉第定律)

$$e = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad [\text{V}]$$

**自 感**

$$e = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [\text{V}]$$

**弗莱明左手定则**

若置于磁场中的导体有电流流过,则产生电磁力。将左手的大拇指、食指、中指分别伸直成直角,则其方向为

大拇指	→ 电磁力方向
食 指	→ 磁场方向
中 指	→ 电流方向

**弗莱明右手定则**

运动导体垂直切割磁通,则在导体中产生感应电动势。将右手的大拇指、食指、中指分别伸直成直角,则其方向为

大拇指	→ 运动方向
食 指	→ 磁场方向
中 指	→ 电动势方向

**感应电动势的大小**

$$e = \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = Blv \sin \theta \quad [\text{V}]$$

**互 感**

若线圈中流过的电流随时间而变化,则在靠近的另一线圈中产生感应电动势。其大小为

$$e_2 = M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad [\text{V}]$$

该比例常数称为线圈间的互感,用下式表示:

$$M = \frac{N_2 \phi_2}{I_1} \quad [\text{H}]$$

**变压器的原理**

两个线圈  $N_1$  及  $N_2$  通过铁心耦合时,一次侧加上电压  $E_1$  时,二次侧的电压  $E_2$  为

$$E_2 = \frac{n_2}{n_1} E_1 \quad [\text{V}]$$



( $n_1$ :线圈  $N_1$  的匝数, $n_2$ :线圈  $N_2$  的匝数)

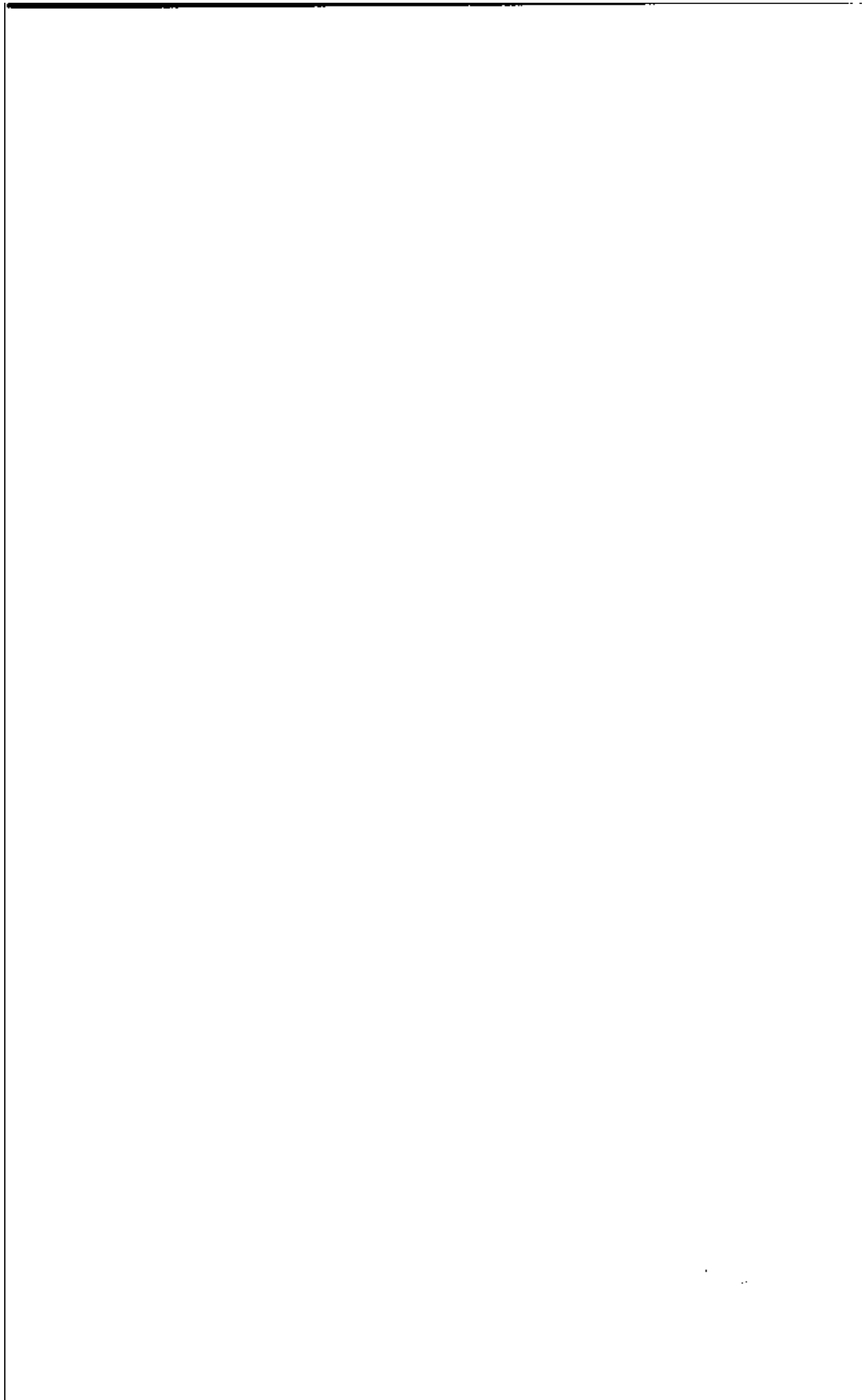
但是,变压器的输出与输入功率可以认为不变( $E_1 I_1 = E_2 I_2$ )

### 磁化曲线( $B-H$ 曲线)

未磁化的铁等磁性体在进行磁化时,即使磁场强度  $H$  增加,磁通密度增加到一定程度就不再增加,这称为磁饱和现象。表示该关系的曲线称为磁化曲线( $B-H$  曲线)。

### 磁滞损耗

若带铁心的线圈流过交流电,则电流方向发生周期性变化,在其一个周期内在铁心中作为热量消耗掉的电功率正好等于磁滞回线内的面积。该损耗称为磁滞损耗。



# III

## 静 电

---

我们从孩童开始就已经知道,摩擦的赛璐珞垫板能吸附纸片,或者知道打雷现象是电的作用引起的。摩擦生电或者将电加以储存的试验在 200 多年前就已经进行了,这对于电气化作出了很大的贡献。

在本章中将学习最初发现电的摩擦生电的本质是什么?与我们日常家庭使用的电有什么关系?电容器是什么东西?另外还将学习静电的应用等。

## 3.1 电 荷

### 为什么带电?

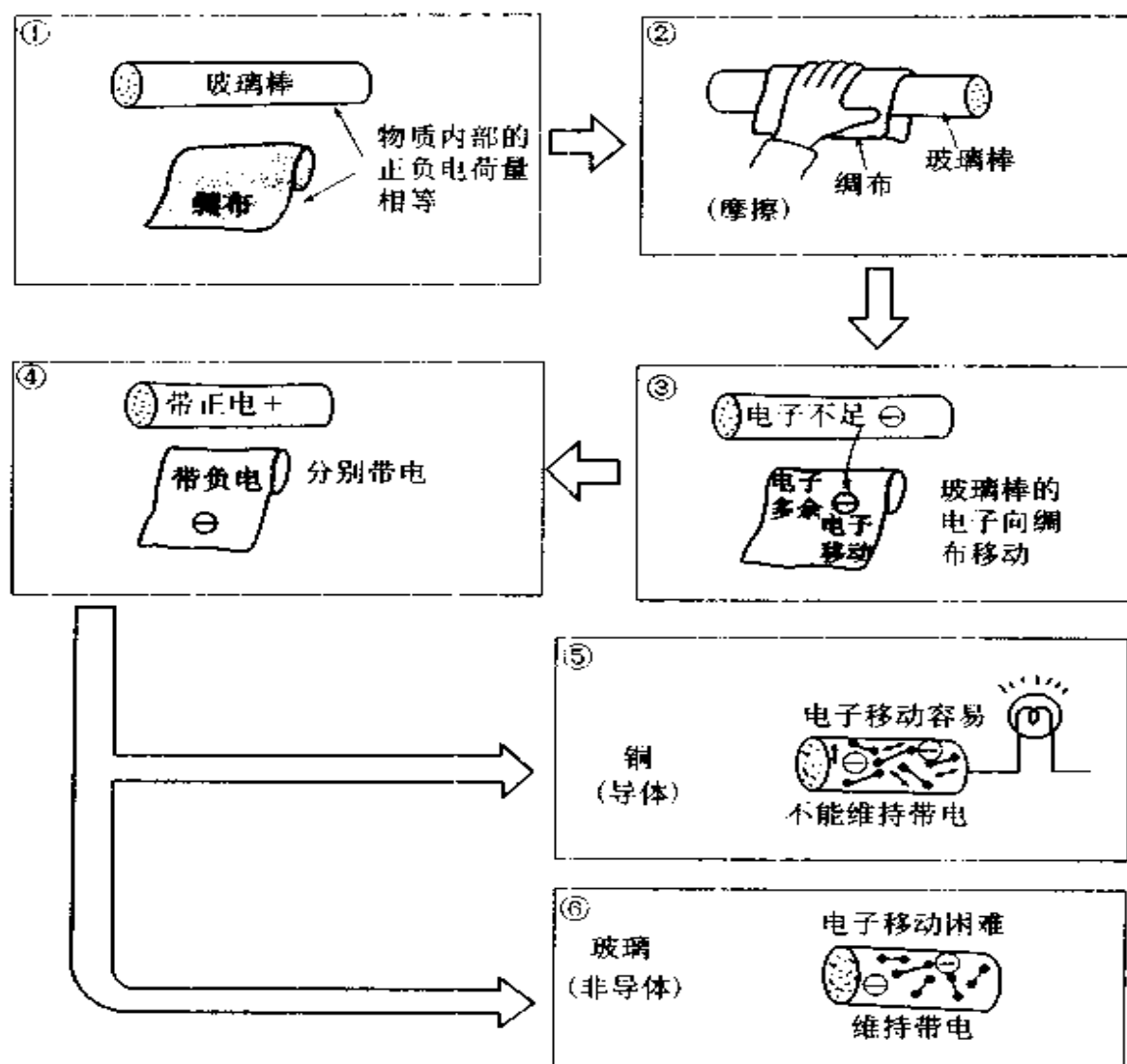


图 3.1

发现静电现象是很早以前的事情,据说大约在公元前 600 年,希腊的哲学家泰勒斯就发现琥珀等物质通过摩擦能吸引羽毛等轻的物体。

上述摩擦生电看起来很简单,但却是意外复杂的现象,另外当时也未发现有什么用途,因此对它的研究也很迟,这大约延迟了 2500 年。近年来,随着高分子工业的发展,大量使用塑料等材料,而这些是很容易带静电的,因此产生了许多因带电而引起的问题。从此以后,静电现象成为我们身边十分关心的一个话题。另外,在它的应用方面,现在研究开发了电子摄影、静电复印、静电吸尘、静电喷涂等大量的项目。另外还知道,物体带电的状态不仅仅是摩擦生电,还存在许多其它的形态。

在本篇中,将追究摩擦生电的本质,研究摩擦生电与第Ⅰ篇及第Ⅱ篇所述的流过铜线的电流有什么关系? 储存电荷的电容器是什么东西? 如何利用? 静电在日常生活上有什么用处? 或者会带来什么损害等。

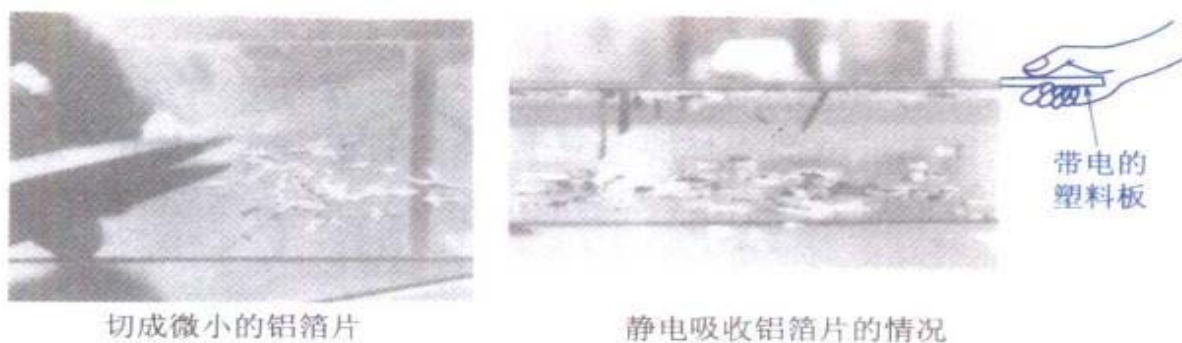


图 3.2

### 3.1.1 摩擦为什么会生电?

在干燥的房间里脱衣服的时候,会听到“劈啪劈啪”的声音,或者感到像针刺那样的电击感觉,常常觉得很吃惊。这个责任要由脱衣服时在衣服上产生的静电来负。由于这是因物体与物体摩擦产生的,所以称为摩擦生电。

例如用毛皮摩擦玻璃棒等物体,则玻璃棒能吸附小纸片或毛

发等轻的物体,这是由于摩擦使玻璃棒带了电,而静电力使纸片或毛发移动。像该玻璃棒那样因摩擦而带了电的现象称为**带电**,这时物体中显出的所带的电称为**电荷**(参见图 3.1 ①~④)。

另外,不同物质摩擦而生的电有两种,一方带正电,而另一方则带负电。将许多物质进行摩擦,观察带正电的和带负电的可知,有一个序列。这如图 3.3 所示,取出序列中两种物质进行摩擦时,总是处于上面的物质带正电,处于下面的物质带负电。

例如用毛皮摩擦玻璃棒,则由于毛皮处于玻璃棒的上面,因此毛皮带正电,玻璃棒带负电。而用棉布摩擦时,则玻璃棒带正电,棉布带负电。

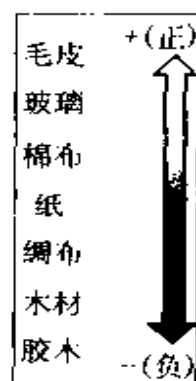


图 3.3 摩擦生电的带电序列

### 3.1.2 电子移动形成电流

不带电的物体因摩擦而一方带正电,另一方带负电,这可以认为是在两种物体接触的部分自由电子由一方向另一方移动而引起的。所谓不带电的物体是由于原子核的正电荷与周围围绕的电子所具有的负电荷平衡(所带电量相等),因此在外部不显出带电性质。

现在,若将某物体进行摩擦,则由于摩擦能量,被夺去一定数量自由电子的物体负电量不够,就变成带正电,而反之,得到一定数量自由电子的物体则由于负电量过剩,就变成带负电。这样物体带电最初表示了物体中所含自由电子的过多或不足的状态。但这一现象也适用于从电池或发电机取出大电流时的情况,在导线内部便开始就存在的自由电子移动,这样就得到电流(参见图 3.4 及图 3.5)。

## 3.1.3 由于带电使质量变化了吗？

通过将两种物体摩擦而带电时,也许会产生一个疑问,物体质量不是会发生变化吗?从理论上讲,由于带电使物体质量应该要发生变化,但实际上完全没有问题。



图 3.4 摩擦生电

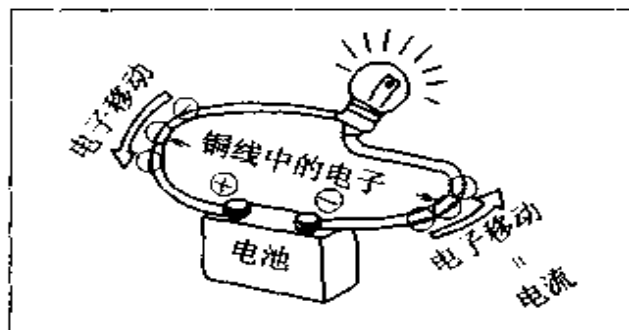


图 3.5 导线中的电子移动

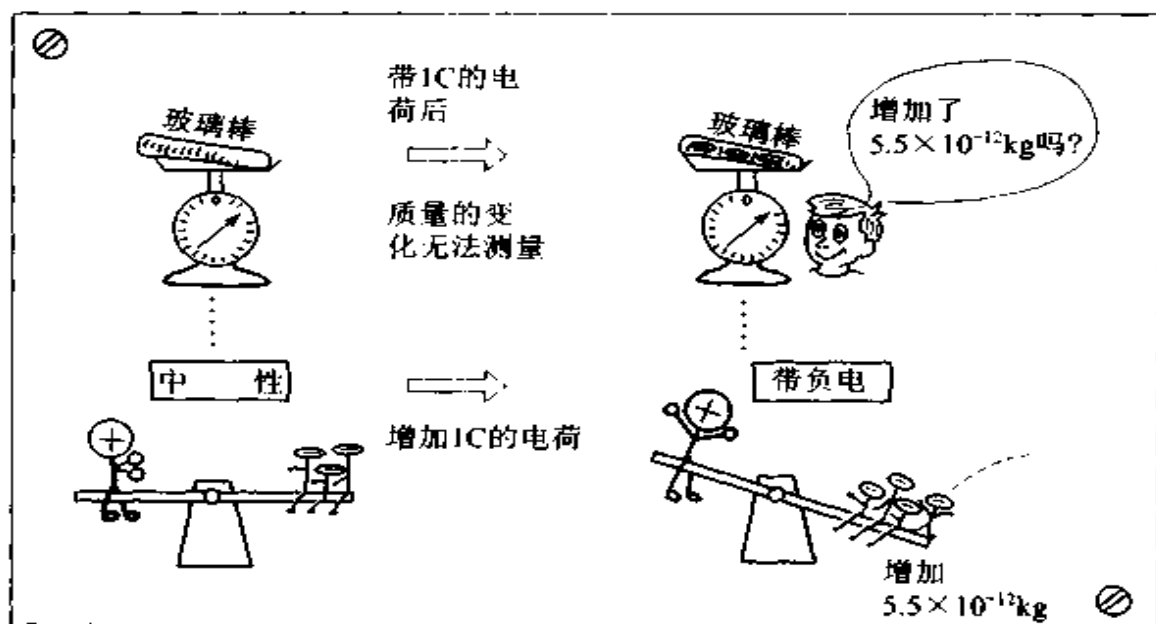


图 3.6

1 个电子具有的质量实际上是非常小的,约  $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ,电量约  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。这里电量的单位 C 称为库仑,表示 1 秒钟流过 1A 电流的电量。

我们将 1C 的电荷给予导体是不可能的,但假定给予了 1C 的电荷,计算一下质量的变化有多少? 结果如下。

即假设给予 1C 的电荷,由于 1C 的电荷引起多余或不足的电子总个数为  $6 \times 10^{18}$  左右,导致质量的增减为  $5.5 \times 10^{-12} \text{kg}$  左右,因此完全可以忽略(参见图 3.6)。

### 3.1.4 非导体容易摩擦生电

想要对银或铜等导体进行摩擦生电却不易,因为即使摩擦也不带电,而玻璃或布等电流难以流过的非导体反而容易产生摩擦生电,这又是为什么?(参见图 3.1⑤、⑥)

这是因为,银或铜等导体有很多与原子核吸引力非常弱的电子(这称为自由电子),因此只要真正一点点能量(摩擦力也属于这一范围)就能使电子移动。另外,移动的电子也容易恢复原状。

根据这一情况,导体不能产生摩擦生电的原因是因为即使摩擦而带电,但电子立即移动恢复原状,因此不能维持带电状态。

而非导体,电子很难移动,移动之后又很难恢复原状,因此能够长期维持带电状态(图 3.7)。

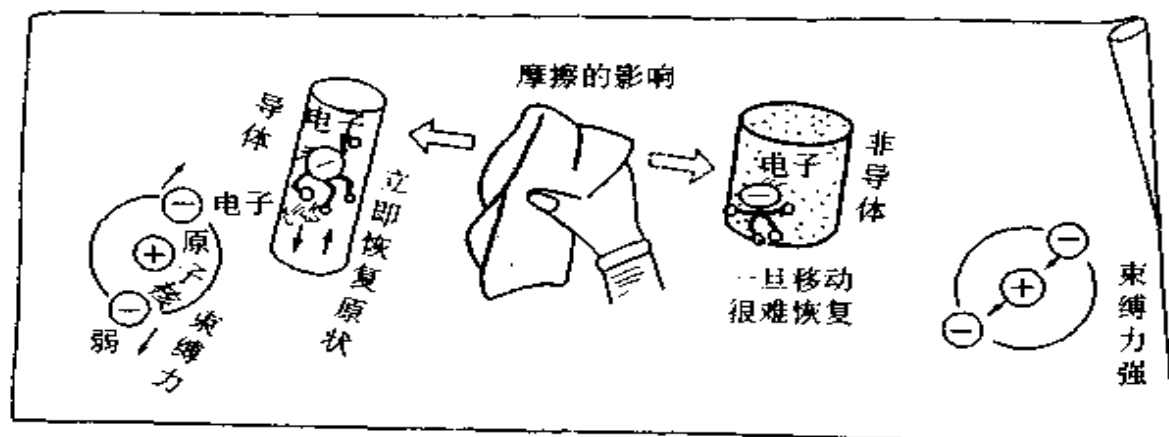


图 3.7



## 3.2 电荷之间的作用力

什么是库仑定律？

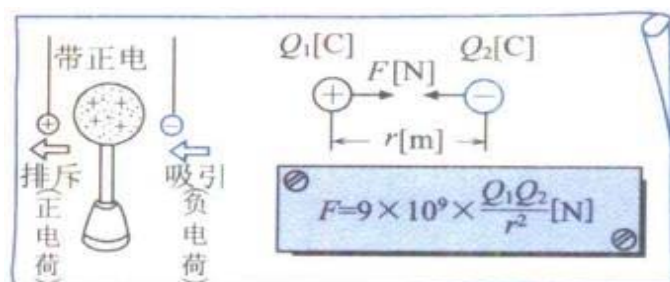


图 3.8

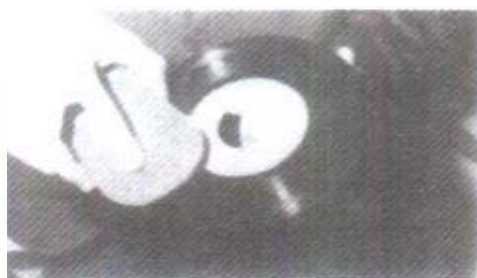


图 3.9 因擦拭唱片而附着灰尘(库仑定律产生的力)

什么是静电感应作用？



图 3.10

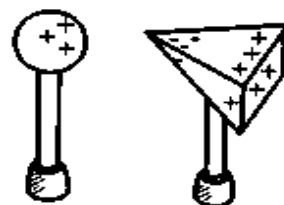


图 3.11

电场强度如何计算？

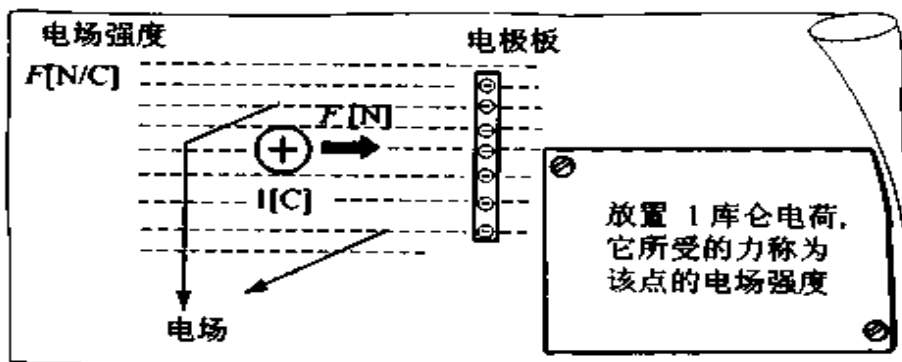


图 3.12



图 3.13 避雷针

### 3.2.1 库仑定律

用干燥毛皮去摩擦水平吊着的胶木棒,再将用毛皮摩擦的另一根胶木棒去靠近它,则吊着的胶木棒要远离。若用绸布摩擦的玻璃棒去靠近它,则吊着的胶木棒要接近。这可以参考前面的带电序列表,看看带电的种类可知,用毛皮摩擦胶木棒,胶木棒带负电;而用绸布摩擦玻璃棒,玻璃棒带正电。因而,开始是负电之间接近,所以产生排斥力,而玻璃棒与胶木棒是正负电起作用,所以是吸引力(图 3.14,图 3.15)。

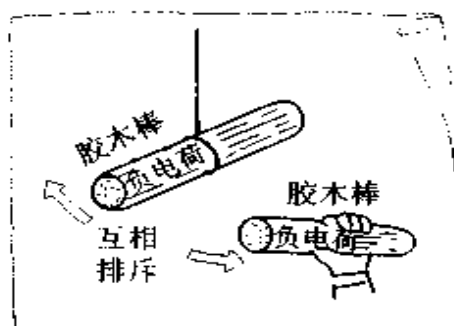


图 3.14

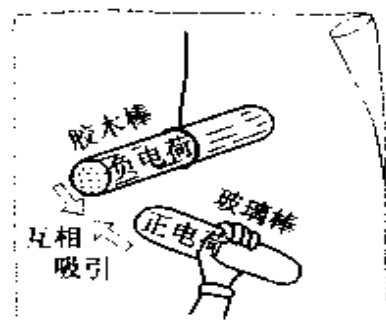


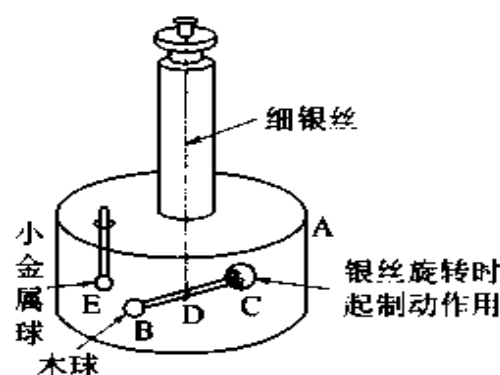
图 3.15

根据这个实验可知,具有相同符号的电荷之间是排斥力起作用,而不同符号电荷之间是吸引力起作用。

库仑做了图 3.16 所示的实验装置,详细研究了这些带电电荷相互间的作用力,结果发现下列的关系。

两个带电体之间的作用力与分别所带电荷的乘积成正比,与距离的平方成反比。另外,作用力的方向处于连接两电荷的直线上。

这称为库仑定律,计算式如



根据距离与扭力发现了库仑定律

图 3.16 库仑使用的测量装置  
(测量 E 与 B 之间电荷的作用力)


下所示:

$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad [\text{N}]$$

式中,  $Q_1$  及  $Q_2$  的单位为库仑, 符号为 C。另外, 前面已经提到, 1 秒钟通过 1 库仑的电量时, 电流的大小为 1 安培。力  $F$  的单位为牛顿 [N]。

电荷产生的力有吸引力及排斥力。 $Q_1$  与  $Q_2$  的乘积为正时, 二者为相同符号, 因此表示排斥力;  $Q_1$  与  $Q_2$  的乘积为负时, 二者为相反符号, 因此表示吸引力。

电容器储存电荷, 在储存电荷状态中, 极板之间有相反极性的电荷, 这些相反极性电荷之间有按照库仑定律所给出的作用力作用(参见图 3.8、图 3.10、图 3.11)。

 在真空中,  $Q_1 = 3 \times 10^{-2} \text{C}$  及  $Q_2 = 12 \times 10^{-2} \text{C}$  的电荷距离 5m 时, 这些电荷间的作用力有多大?

**解答:** 根据上式有

$$\begin{aligned} F &= 9 \times 10^9 \times \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \\ &= 9 \times 10^9 \times \frac{3 \times 10^{-2} \times 12 \times 10^{-2}}{5^2} \\ &= 13 \times 10^5 \text{N} \end{aligned}$$

式中要注意单位,  $r$  为 m,  $Q_1$  及  $Q_2$  为 C。

——→ 电荷间的作用力为  $13 \times 10^5 \text{N}$

• **1 库仑电荷的大小** 前面已经学习了库仑定律, 这里就 1 库仑电荷是具有怎样大小的电荷, 从力的大小来进行换算。

首先, 将 2 个 1 库仑的电荷距离 1m, 计算在空气中的静电力为

$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{1 \times 1}{1^2} = 9 \times 10^9 \text{N}$$

这里, 由于 1kg 重的力与 9.8N 的力相同, 因此

$$\frac{9 \times 10^9}{9.8} \approx 918 \times 10^6 \text{ kg} = 918000 \text{ t}$$

可以想像显示 918000 t 的力的电荷是如何大的东西。

在前一篇中学习了磁可知,实际上是不可能将 NS 极分开单独取出,而静电中的正负电荷都能够单独取出,这是有根本不同的,希望读者要认识到这一点。

### 3.2.2 静电感应与静电屏蔽

如图 3.17 所示,在绝缘的金属棒上储存有静电,当它靠近其它金属体时,出现了接近的部分感应出异性电荷、而相反一侧(远离的一侧)感应出同性电荷的感应现象。

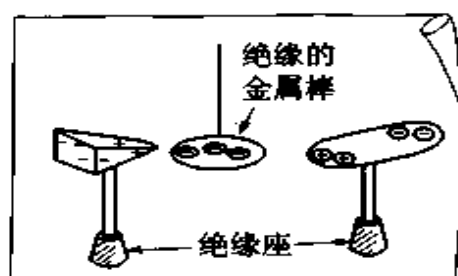


图 3.17 静电感应

这里在金属体之间是利用空气绝缘的,因此电荷不能移动。但若静电力非常大,或空气潮湿的时候,有时也会通过所谓放电现象产生电荷移动。这样在分离的金属体上引出电荷的现象称为静电感应。使我们感到烦恼的打雷现象(图 3.18),就是绝缘破坏产生放电而使电荷产生移动的现象。

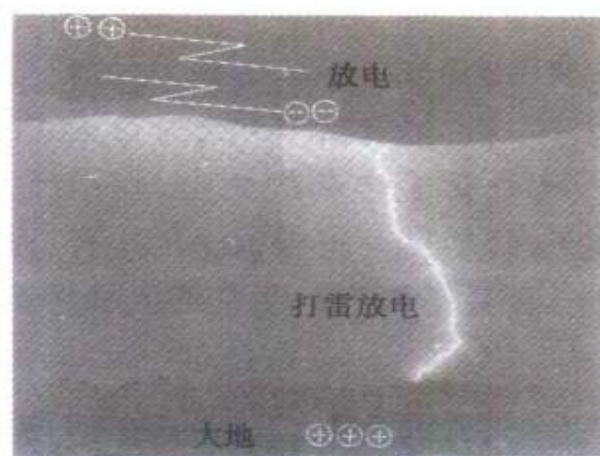
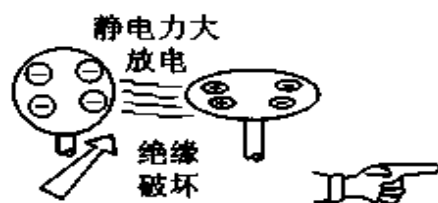


图 3.18

金属因静电感应而带电,但若用另外的金属包围某一金属,而将该另外的金属与大地相连(接地),则当中被包围的金属就不产生静电,这称为**静电屏蔽**(图 3.19)。

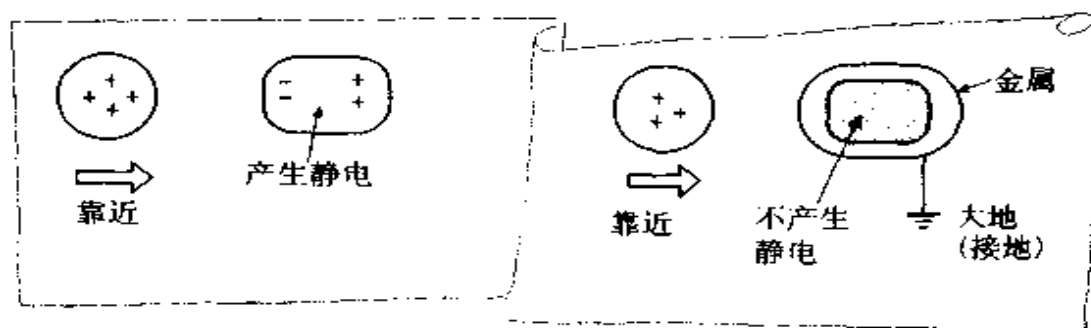


图 3.19

• **防止设备产生静电感应** 在电气设备技术标准等法规中规定,采取增大间隔距离或给电话机附加安全装置等方法,使得不因输电线或配电线的电压对附近的电信及电话等弱电线路产生的静电感应而妨碍设备的正常运行。

### 3.2.3 所谓电场

若有两个以上的电荷,已经知道它们之间有吸引力或排斥力的作用,它们的计算方法也已了解。也知道电荷越大,这些力也越大。这种情况下,若考虑力所反映的场,并将其称为**电场**来加以表述,则在研究静电中是非常方便的。这个力是隔着空间情况下产生的力,为了对此进行说明,如同磁场中考虑磁力线那样,在电场中也考虑有一个称为**电力线**的假想作用线。电场对电荷有力作用,其大小根据对 1 库仑正电荷作用几 N 的力来决定。

将该力的大小及其作用方向称为**电场的大小与方向**。即电场的大小(或称为**电场强度**)用作用于电荷的力来表示。下面用具体数值进行计算。

• 电场强度的计算 如图 3.12 所示,若有 1 库仑正电荷时,有  $F[\text{N}]$  的力作用,则该点的电场强度为  $F[\text{N/C}]$ 。现在若有一个力与该力  $F$  相反,并使该 1 库仑的电荷移动  $1\text{m}$ ,则所做的功为  $F[\text{N}] \times 1[\text{m}] = F[\text{N} \cdot \text{m}] = F[\text{J}]$  (图 3.20)。

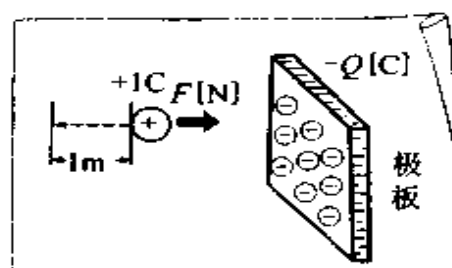


图 3.20

## 3.3 电容器的构造

### 什么是电容器？



图 3.21 小容器的电容器



图 3.22 大容器的电容器

### 电容器的构造

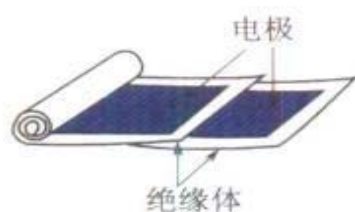


图 3.23

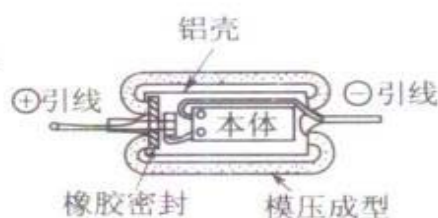


图 3.24



图 3.25

### 通过实验了解储存了多少电荷

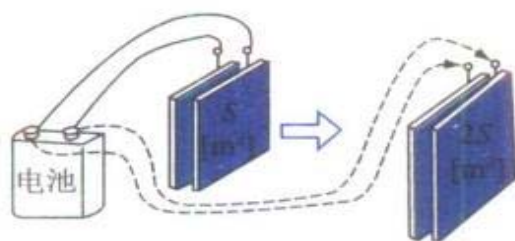


图 3.26 充 电

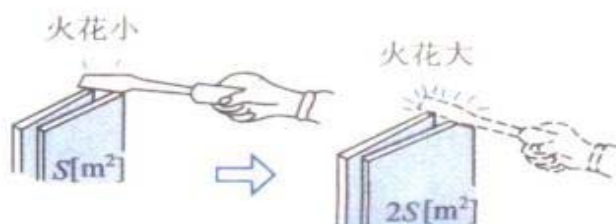


图 3.27 放 电

### 3.3.1 储存电荷的电容器

导体或绝缘体上储存了电荷,会产生各种作用,但也有的会产生不利的一面。而电容器能大量储存电荷,利用它作为电路元件,是非常有用处的。

代表性的电路元件有电阻器及有电感的线圈,这在前面已经学习过了,电容器是与这些元件有同等重要作用的元件。

电容器到底具有什么样的构造?又是如何储存电荷?将在下面加以介绍。

### 3.3.2 电容器的构造

电容器有各种构造,使用的绝缘材料也有许多种,但简单地说,是将两片金属板靠近,在中间充满电介质(绝缘体),从金属板引出两个端子,从而具有储存电荷的性质。

结构上由于直流不能通过而交流能够通过,因此在收音机或电视机电路中,根据不同情况,分别利用电容器的这些性质(图 3.23、图 3.24、图 3.25)。

电容器的种类从结构上来分有下列三种:

(1) 固定电容器(电容量一定)。

(2) 微调电容器(电容量在一定范围内调整)。

(3) 可变电容器(经常用来改变电容量,具有改变电容量的机构)。

图 3.23 所示的纸质电容器是属于固定电容器的一种,它是由电容器纸(厚  $0.08 \sim 0.012\text{mm}$ )与铝箔(厚  $0.01\text{mm}$ )制成,特别是如果电容器纸含有石蜡或氯化萘等,则能够承受高达  $1000\text{V}$  左右的电压。

图 3.25 所示的电解电容器是将铝箔作为阳极,在硼酸铵溶液中进行电解,将在其表面生成的薄膜( $5 \times 10^{-5} \sim 25 \times 10^{-5}\text{mm}$ )作为电介质,是一种小型、大容量且便宜的电容器。

它使使用中不断地重新生长电介质薄膜,但若长时间不用,性能会恶化。电解电容器具有极性,必须要注意正负极性。



另外,云母电容器是采用云母作为电介质,由于云母的绝缘性能很好,因此适用于高电压的电容器。

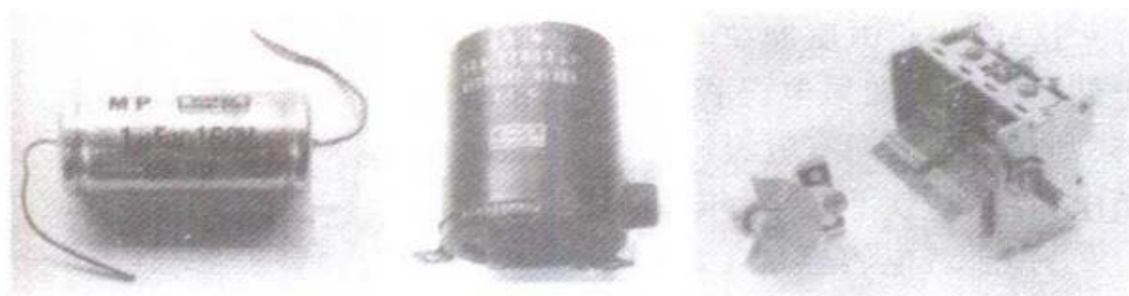


图 3.28 无极性电容器 图3.29 电解电容器(有正极与负极) 图 3.30 可变电容器(收音机用)(改变极板相对的面积)

钛电容器是使用陶瓷作为电介质,其特点是易于小型化,且适用于高频的交流。

• 电容器放电电流与发电机输出电流的比较 电池或发电机能够输出的最大电流在规格表中或铭牌上已经标明,不允许超过该电流。而对电容器在将储存的电荷作为电流放出时,该电流不流经其内部,因此对于像照像或频闪光灯那样需要瞬间大电流的情况,电容器照理是非常适合的(图 3.31)。

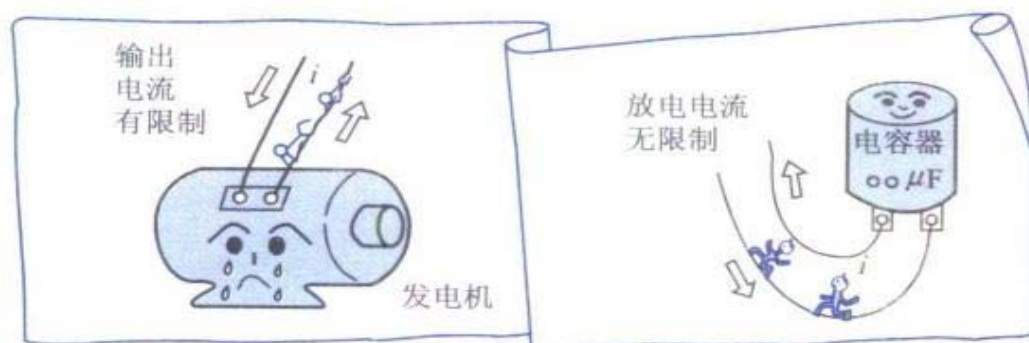


图 3.31

• **电容器充电及电荷量的判断** 如图 3.26 所示,利用电池对电容量不同的两个电容器充电(将电荷给电容器,这称为充电)。

这样,当将电压加在电容器上,则电极板上储存电荷。如果电极板短路,或者绝缘不够,则在电极板间有电流流过,电极板上的正负电荷中和,就不能储存电荷(图 3.32)。

另外,若电容器加上超过一定大小的电压,有时绝缘会损坏,使电容器不能使用。因此,必须标明能够承受多大的电压,该值称为电容器的耐压。电容器上通常标明耐压大小,电容器必须在耐压以下使用。

电容器中储存的电荷量多少可以用下面的方法简单进行判断,将如图 3.26 所示充电的电容器如图 3.27 所示用螺丝刀的尖端将极板之间进行短路。不容许直接将电池等电源的电极短路,但在用电容器做这样的实验中,进行短路没有关系。这时,容量大的电容器,放电电流也大,所产生的火花也大,因此可以知道储存了许多电荷。但是实验时,不要用手碰触螺丝刀的金属部分。

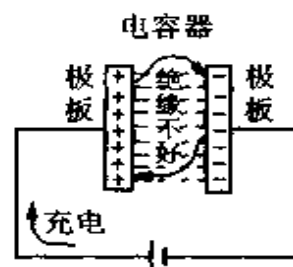


图 3.32 由于中和而不能储存电荷

## 3.4 电容量

$Q = CV$  意味着什么?

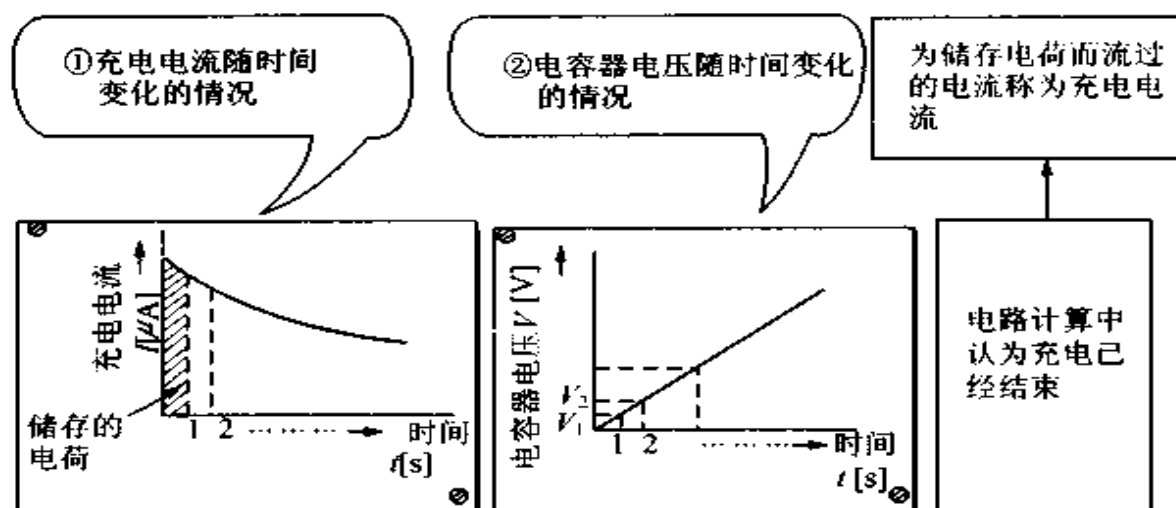


图 3.33

增大电容量的方法

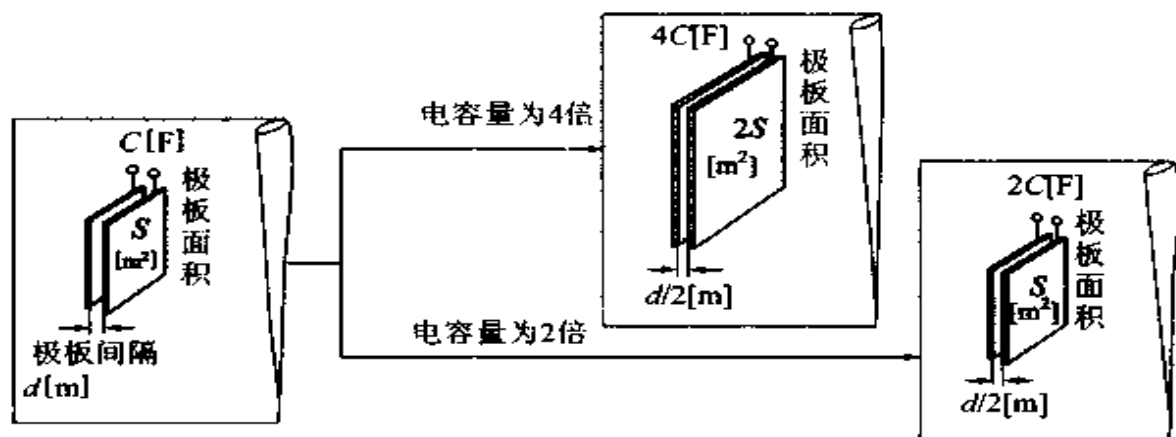


图 3.34

### 3.4.1 电容器的电容量

电容器能储存多少电荷？表示该储存能力大小的称为**电容量**或**容量**。表示电容量的符号用  $C$ ，单位用法拉（符号为  $F$ ）。基本单位是法拉，但实际上这个单位太大，因此通常用它的百万分之一，这读作  $1\mu F$ （微法）。

下面利用图 3.35 的电路来研究电容器储存的电荷、电容量与电容器端电压之间的关系。

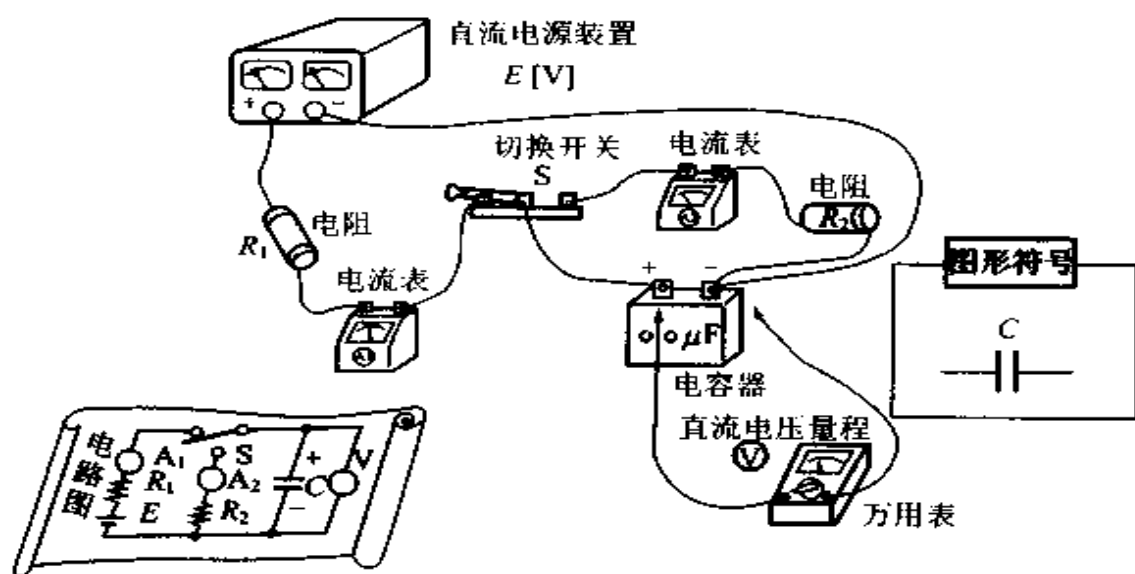


图 3.35 电容器的充放电电路

### 3.4.2 电荷 $Q$ 、电容量 $C$ 与电压 $V$ 的关系

如图 3.35 所示，将开关接通，从直流电源装置对电容器流过充电电流，电荷不断储存。从实验中可看出，开始流过电流较大，慢慢地越来越小，终于电流停止（储存电荷的电流称为充电电流，电路计算时一般是考虑储存电荷后的状态）。

将该情况用曲线表示，则如图 3.33①所示，斜线部分表示最初 1 秒钟储存的电荷。另外，随着电荷的积累，则电容器的端电压也不断上升。该情况如图 3.33②所示。

即随着时间的增加，充电电流不断减少，电容器储存电荷不断增加，端电压不断上升。因此，用图形表示电荷  $Q$  与端电压  $V$

的关系,则如图 3.36 所示。

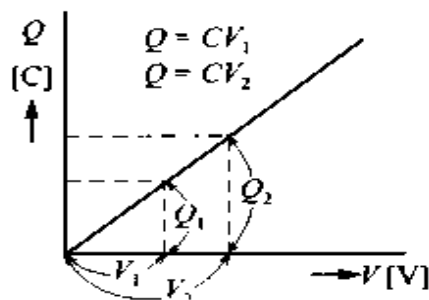


图 3.36

由图 3.36 可知,  $Q$  与  $V$  成正比。  
设比例常数为  $C$ , 则下式成立。

$$Q = CV$$

( $Q$ : 电荷,  $C$ : 电容量,  $V$ : 端电压)

由上式可知, 电容器储存的电荷与电容量  $C$  的大小有关,  $C$  越大, 即使以低电压也能储存更多的电荷, 而  $C$  如果很小, 即使以高电压也只能储存很少的电荷。

例如, 利用 1V 的电压储存 1C 的电荷时, 则电容量称为 1F, 而储存  $1\mu\text{C}$  的电荷时, 具有  $1\mu\text{F}$  的电容量。

另外, 切换图 3.35 的开关, 则电容器储存的电荷通过电阻放电。

**例题** 如图 3.37 所示, 当具有  $4\mu\text{F}$  电容量的电容器加上 100V 时, 储存的电荷(电量)为多少?

**解答:**

$$Q = CV = 4 \times 10^{-6} \times 100 = 4 \times 10^{-4} \text{C}$$

—— 电荷为  $4 \times 10^{-4} \text{C}$

**问题 1** 将  $0.001\mu\text{F}$  的电容器与电源相连, 以 330V 充电, 则储存电荷为多少?

**解答:**  $0.33 \times 10^{-6} \text{C}$  或  $0.33\mu\text{C}$

**问题 2** 在问题 1 中, 断开电源, 在极板之间插入蜡纸, 不形成间隙, 导致电容量改变, 若电压变为 150V, 求这时的电容器的电容量。

(提示) 由于电源断开, 因此电荷没有移动, 电荷仍然保持问题 1 的解答的数值, 只要注意这一点就可求解。

**解答:**  $0.0022\mu\text{F}$

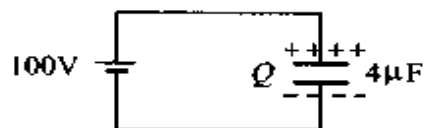


图 3.37

### 3.4.3 大量储存电荷的条件

电容量  $C$  取决于电极板的间隔  $d$  [m]、相对的面积  $A$  [ $\text{m}^2$ ] 以及极板间的物质种类等, 与结构上的条件有很大关系。

一般都知道, 电容器的电容量  $C$  与极板的间隔  $d$  成反比, 与相对面积  $A$  成正比, 其大小可由下式求出:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

式中,  $\varepsilon$  称为介电常数, 取决于放入电极板之间的物质, 分别具有固定的数值。介电常数  $\varepsilon$  可用下式表示:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_s = 8.85 \times 10^{-12} \times \varepsilon_s$$

$\varepsilon_0$  表示真空中的介电常数。 $\varepsilon_s$  表示某物质的介电常数与真空中介电常数相比的倍数, 称为相对介电常数。空气与真空中近似相等, 表 3.1 所示为相对介电常数之值。

越使用  $\varepsilon$  大的材料, 越能储存更多的电荷(如图 3.38)。

如果电容器极板的间隔缩小为  $1/2$ , 则电容量变为 2 倍, 若以该状态为基础, 再使相对面积变大为 2 倍, 则电容量变为 4 倍。图 3.34 所示即为这样的关系。

表 3.1 相对介电常数之值

绝缘体的种类	$\varepsilon_s$ 的大小
空气	近似为 1
纸	1.2 ~ 2.6
胶木	2.7 ~ 2.9
云母	4.5 ~ 7.5
石蜡	2.1 ~ 2.5
橡胶	2.0 ~ 3.5
玻璃(石英)	3.5 ~ 4.5
酚醛树脂	4.5 ~ 5.5
陶瓷(氧化钛)	30 ~ 100

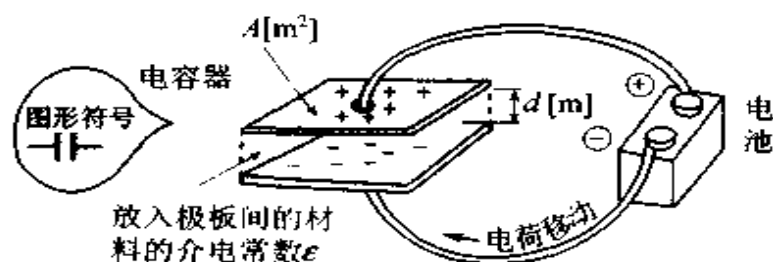


图 3.38

## 3.5 电容器串并联

### 并联电容器的等效电容量

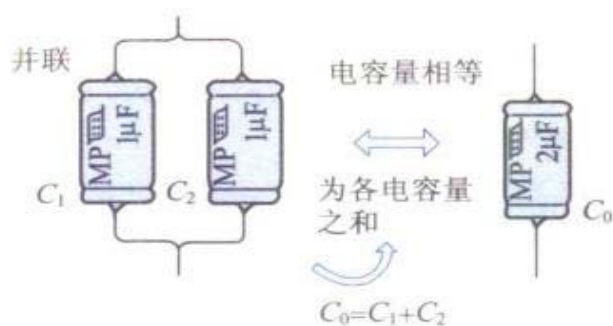


图 3.39

### 串联电容器的等效电容量

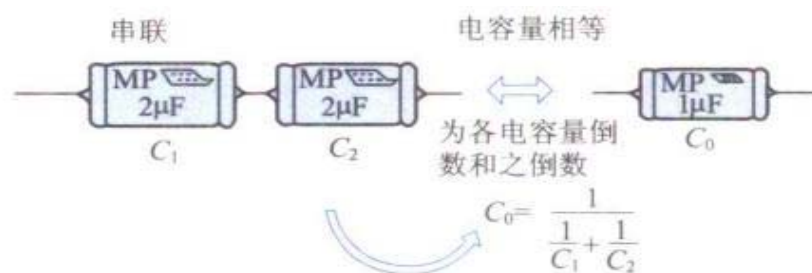


图 3.40

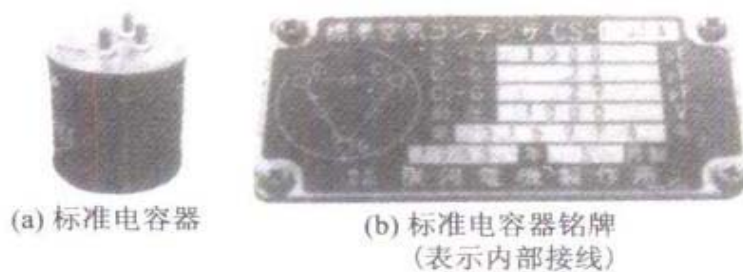


图 3.41 标准电容器及铭牌

## 3.5.1 电容器并联

将电容器  $C_1[F]$  与电容器  $C_2[F]$  并联, 当与电压  $E[V]$  的直流电源连接时, 分别储存的电荷为  $Q_1 = C_1 E$  及  $Q_2 = C_2 E$ , 因此总的储存电荷  $Q[C]$  由图 3.42 可知为

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 E + C_2 E = (C_1 + C_2) E$$

式中, 令  $C_1 + C_2 = C_0$ , 则

$$Q = C_0 E \quad [C]$$

即将  $C_1$  与  $C_2$  两个电容器并联, 它的电容量与 1 个  $C_1 + C_2$  电容器的电容量相等。

**电容器并联的等效电容量为各电容量之和。**

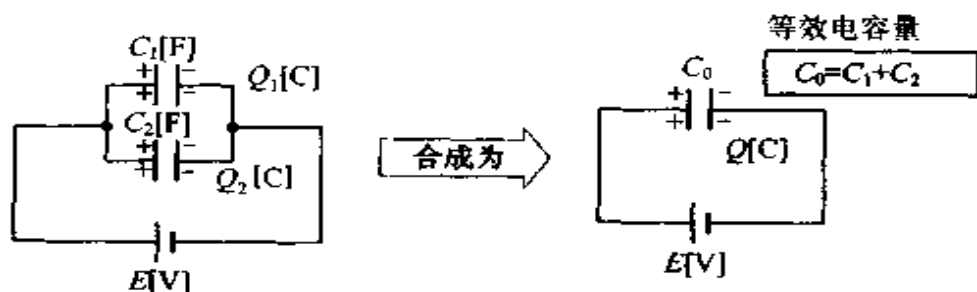


图 3.42

**例题** 求电容量为  $2\mu F$ 、 $4\mu F$ 、 $8\mu F$  的三个电容器并联时的等效电容量  $C_0$ 。

**解答:** 由于电容器并联时等效电容量为各电容量之和, 因此

$$C = C_1 + C_2 + C_3 = 2 + 4 + 8 = 14 \mu F$$

——→ 等效电容量为  $14\mu F$

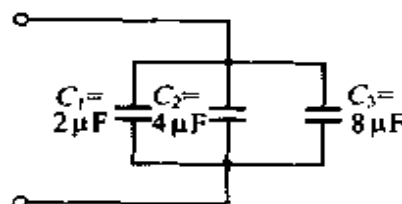


图 3.43



## 3.5.2 电容器串联

如图 3.44 所示,将电容器  $C_1$  [F] 与  $C_2$  [F] 串联,当与电压  $E$  [V] 的直流电源连接时,该电路中产生电荷移动,在两个电容器中储存电荷。由于两个电容器串联,因此两电容器的电荷移动相同,两电容器储存的电荷也相同。但是端电压  $E_1$  与  $E_2$  不相等,分别为  $E_1 = Q/C_1$  及  $E_2 = Q/C_2$ 。总的电压为

$$E = E_1 + E_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = Q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)$$

所以 
$$Q = \frac{1}{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)} E$$

式中,设  $1/[(1/C_1) + (1/C_2)] = C_0$ , 则

$$Q = C_0 E \quad [C]$$

即将  $C_1$  与  $C_2$  两个电容器串联,它与 1 个具有  $1/[(1/C_1) + (1/C_2)]$  电容量的电容器相同。

电容器串联的等效电容量为各电容量倒数之和的倒数

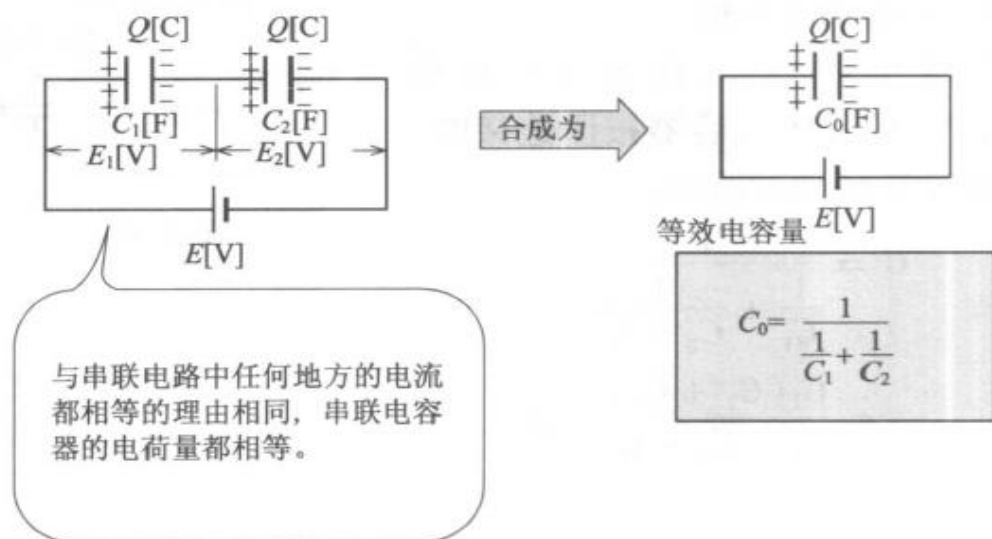


图 3.44

如图 3.45 所示, 求电容量为  $2\mu\text{F}$ 、 $5\mu\text{F}$ 、 $10\mu\text{F}$  的三个电容器串联时的等效电容量  $C$ 。

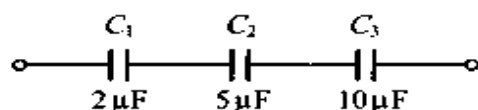


图 3.45

解答: 由于电容器串联的等效电容量为各电容量倒数之和的倒数, 因此

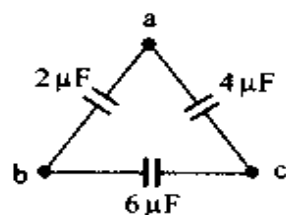


图 3.46

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{5} + \frac{1}{10}} \\ &= 1.25\mu\text{F} \end{aligned}$$

→ 等效电容量为  $1.25\mu\text{F}$

问题 在如图 3.46 所示的电容器连接中, 求  $ab$  间、 $bc$  间、 $ca$  间的等效电容量。

解答:  $ab$  间为  $4.4\mu\text{F}$ ,  $bc$  间为  $7.33\mu\text{F}$ ,  $ca$  间为  $5.5\mu\text{F}$ 。

### 3.5.3 电容器串并联

如图 3.47 所示, 电容量分别为  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  的三个电容器按图连接时, 等效电容量  $C$  如下所示:

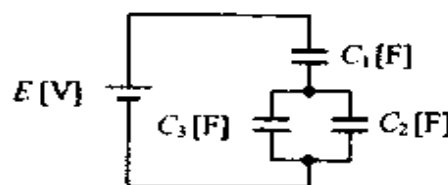


图 3.47

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 + C_3}} \\ &= \frac{C_1(C_2 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3} \quad [\text{F}] \end{aligned}$$

**例 3.13**  $E = 200\text{V}$ ,  $C_1 = 10\mu\text{F}$  及  $C_2 = 5\mu\text{F}$  的两个电容器并联, 回答下列问题:

- (1) 求  $C_1$  储存的电荷。
- (2) 求  $C_2$  储存的电荷。
- (3) 求总的储存电荷。
- (4) 求等效电容量。

**解答:**

- (1)  $C_1$  中的电荷为:

$$Q_1 = C_1 E = 10 \times 10^{-6} \times 200 = 2 \times 10^{-3} \text{C}$$

- (2)  $C_2$  中的电荷为

$$Q_2 = C_2 E = 5 \times 10^{-6} \times 200 = 1 \times 10^{-3} \text{C}$$

- (3) 总的电荷为

$$Q_1 + Q_2 = 2 \times 10^{-3} + 1 \times 10^{-3} = 3 \times 10^{-3} \text{C}$$

- (4) 等效电容量为

$$\begin{aligned} C_0 &= C_1 + C_2 = 10 \times 10^{-6} + 5 \times 10^{-6} \\ &= 15 \times 10^{-6} \text{F} = 15\mu\text{F} \end{aligned}$$

—— (1)  $2 \times 10^{-3} \text{C}$ , (2)  $1 \times 10^{-3} \text{C}$ , (3)  $3 \times 10^{-3} \text{C}$ , (4)  $15\mu\text{F}$

#### • 应用计算

**例 3.14** 如图 3.48 所示, 有一个电池与电阻和电容连接的电路。该电路中流过稳定电流时, 求下列数值:

- (1) 流过的电流强度
- (2) 端子 a 与端子 c 之间的电位差
- (3) 使端子 a 与端子 b 的电位相等时的电容器 C 的电容量

**解答:**

(1) 在直流电路中, 电容器储存电荷, 但不流过电流。因而这种情况下, 电流的路径是电池  $\rightarrow 200\Omega \rightarrow 500\Omega \rightarrow 200\Omega \rightarrow$  电池。总电阻为

$$200 + 500 + 200 = 900\Omega$$

因而电流大小  $I[\text{A}]$  为

$$I = \frac{90}{900} = 0.1 \text{A}$$

(2) 端子 a 与端子 c 之间的电位差等于  $200\Omega$  电阻两端的电位差(电压),因此

$$0.1 \times 200 = 20\text{V}$$

(3)  $100\mu\text{F}$  与  $C[\mu\text{F}]$  的串联电路虽不流过电流,但由于各电容器储存有电荷,因此电容器两端产生电压。所以如图 3.49 所示,当 Aa 间与 Ab 间的电压相等时,点 a 与点 b 的电位相等。

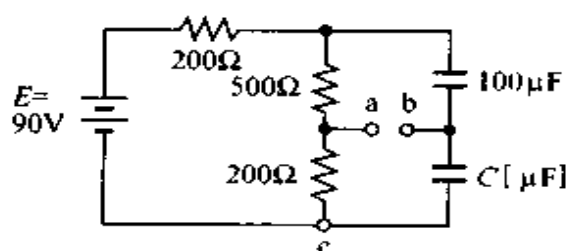


图 3.48

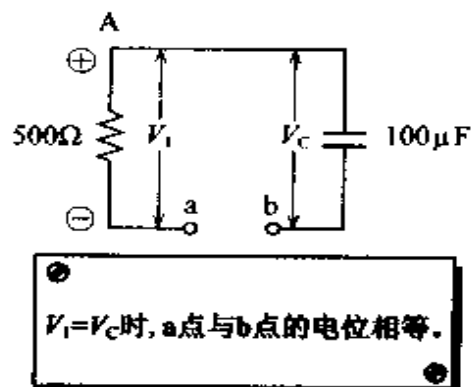


图 3.49

由于 Aa 间的电压为  $500 \times 0.1 = 50\text{V}$ , 因此必须是  $V_c = 50\text{V}$ 。  $100\mu\text{F}$  电容器储存的电荷为

$$Q = CV = 100 \times 10^{-6} \times 50 = 5 \times 10^{-3}\text{C}$$

这里  $100\mu\text{F}$  的电容器与电容器  $C$  (电容量为  $C[\mu\text{F}]$ ) 储存的电荷相等, 若端子 a 与端子 b 的电位相等, 则连接 ab 两点, 电路不发生变化, 因此根据 (2) 求的结果,  $C$  两端的电压为  $20\text{V}$ , 所以

$$5 \times 10^{-3} = C \times 20 \times 10^{-6}$$

所以  $C = 250\mu\text{F}$

——→ (1)  $0.1\text{A}$ , (2)  $20\text{V}$ , (3)  $250\mu\text{F}$

# 3.6 静电的利用

静电集尘

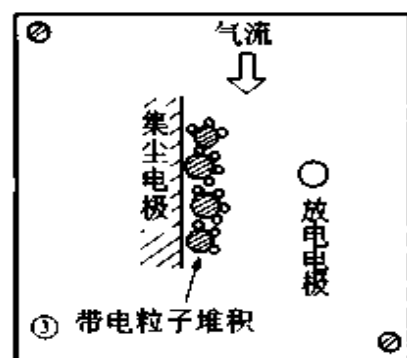
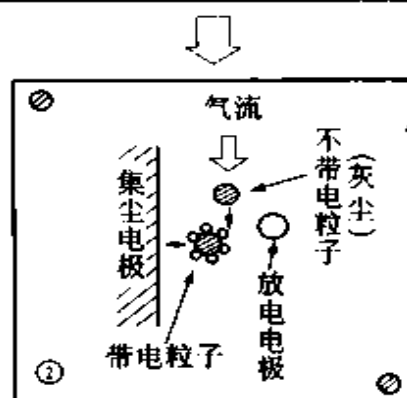
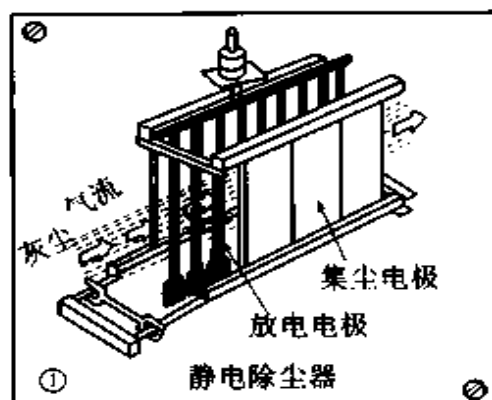


图 3.50

静电印刷



图 3.51 静电复印机

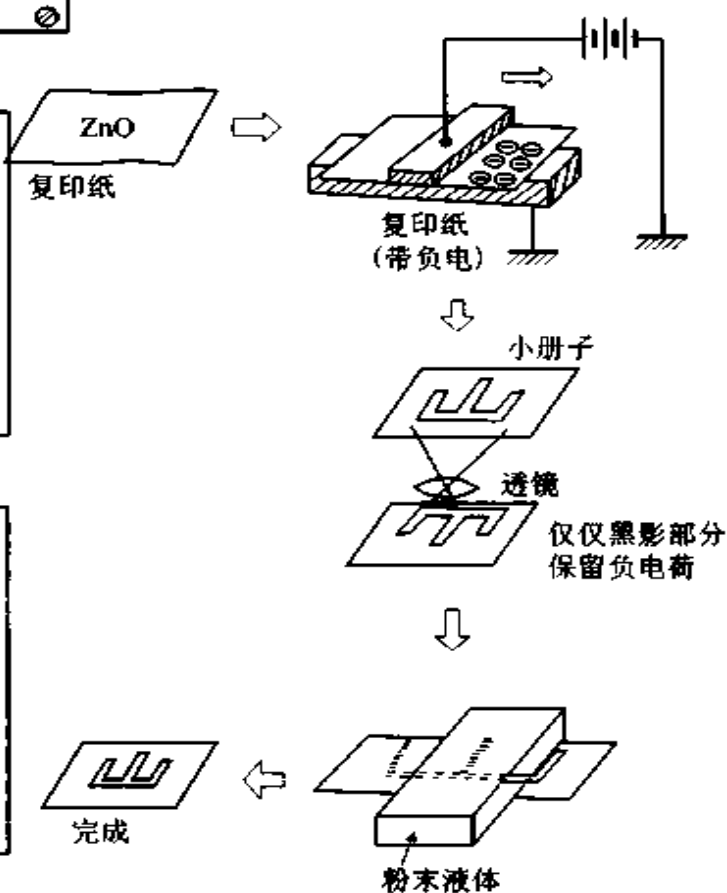


图 3.52

### 静电的应用范围

静电的应用很早以前就知道有静电除尘器,但其它方面就不太知道。但是,最近特别是随着环境保护等方面的技术进步,除了静电喷涂、电子印刷以外,还有空气清洁器、静电分选、生产工序中的各种精炼分选等,静电获得了广泛的应用。

静电除尘器是安装在火力发电厂及炼铁厂等的炉子烟道中,除去排气中的微粒。该装置是在放电电极与集尘电极之间加上直流高压,然后使微粒带电而附着在集尘电极上。该方法对于解决空气污染等环保措施是极其有效的,有空气清洁器等多种用途。

**(a) 静电除尘装置的构造和原理** 静电除尘装置基本上由下列几部分构成:

- (1) 进行电晕放电的放电电极;
- (2) 收集因电晕电流而带电的粒子的集尘电极;
- (3) 供给电晕电流的直流高压电源;
- (4) 将附着的带电粒子(粉尘)从集尘电极上剥离并有效地回收至料斗的装置;
- (5) 将料斗中回收的粉尘加以清除的灰尘处理设备。

对火力发电厂、炼铁厂、焚烧厂、化学工厂等排出粉尘的限制,不论装置大小是越来越严格。静电除尘装置所要求的基本功能如上所述。

图 3.50①为其原理构造图。图 3.50②表示从放电电极流过的粉尘粒子因电晕电流而带电的状态,图 3.50③所示为因该电晕电流而带电的粒子在库仑力及该位置电场的作用下向集尘电极运动的状态。

这样,利用静电作用聚集在集尘电极的粉尘达到一定厚度时,进行机械性的敲打,将堆积的粒尘从集尘电极上剥离,靠其自重落下。从集尘电极剥离的粉尘为相当大的凝聚体,以很快的速度落下,回收在设置于下方的料斗中。

**(b) 电子印刷** 电子印刷有各种各样方式,目前有在办公室等一般使用的静电复印、传真、电子摄影等,它是在非导体上使复印对象的照片等图像带电生成潜像,再在其上附着带色粒子而完

成的。以唱片等作为例子可知,由于静电的影响会吸附灰尘,这是非常讨厌的现象,但静电复印机正如将吸附灰尘的不利的一面应用于我们的日常生活中,发挥了很好的作用(图 3.51)。

复印机有各种类型,如下所述是其中的一个例子。采用涂有  $\text{ZnO}$ (氧化锌)、 $\text{PbS}$ (硫化铅)或  $\text{CdS}$ (硫化镉)等的纸张作为复印纸,该纸一照光就显示低电阻特性,而在遮光的暗处则显示高电阻特性。将这样的复印纸用于电子印刷时,使整张纸暂时带静电(带负电荷),将想要复印的小册子等页面通过透镜利用光照射到纸面上。

如图 3.52 所示,若将印刷的文字或图像照射到复印纸上,则白的部分光线反射很强,文字或图像的黑的部分成为黑影。因此,复印纸上光照的部分电阻减小,所带的负电消失,而仅仅在文字或图形的黑暗部分,负电荷仍保留。然后,通过黑色粉末的液体,这些粉末利用库仑力仅仅附着在电荷残留部分,变成眼睛能看得见的文字或图像,这就是复印机的原理。

除此之外还有静电喷涂,它是让涂料本身带电,使其附着在工件上,因此不会浪费涂料,而且卫生。

在这些例子中可知,静电的作用除了单纯附着作用以外,还能够对微细粒子或元件进行控制,因此在生产工厂的各工序中当然可以开发应用,还可以在从医疗卫生至宇航工业这样广泛的领域内考虑应用,现在还在研究之中。

**(c) 静电造成的危害及其防止** 在利用静电的反面,静电给日常生活也常常带来很多麻烦,特别是在化学工厂等处,有时静电危害发展成为灾害。例如

- (1) 造纸厂内由于静电卷起的纸屑及纸粉;
- (2) 纤维厂的纤维碎屑、料渣、绒毛及断头;
- (3) 胶卷厂的胶卷屑,以及缠辊现象;
- (4) 制粉厂堵塞筛孔;
- (5) 接触带电机器及产品时产生电击及由于静电感应的二次灾害;
- (6) 燃料引火导致火灾爆发。

为了防止发生静电(防止灾害),要充分研究静电产生的机理及作用,原则上从下述两方面考虑:

- (1) 减少静电的产生;
- (2) 使产生的静电不要集聚。

另外,作为防止对人体静电感应的方法,可以穿着导电性的静电作业服或静电鞋,或者重新调换地面等作业周围使用的材料。



## 本章小结

### 带 电

是指因摩擦而生电的现象。不同物质摩擦产生的电荷有两种,一种带正电、另一种带负电。

### 电 流

电子的移动形成电流(使导线中自由电子移动而形成电流)。

### 库仑定律

$$F = 9 \times 10^9 \times Q_1 Q_2 / r^2 \text{ [N]}$$

( $r$ :电荷间的距离[m],  $Q_1$  及  $Q_2$ :电荷[C])

### 静电感应

金属因静电感应而带电,但若某一金属被其它金属包围,而外面的金属与大地连接(接地),则当中的金属不产生静电感应。

### 电荷、电容量与电压的关系

$$Q = CV \quad (Q:\text{电荷}, C:\text{电容量}, V:\text{电压})$$

### 电容器串并联

(1) 电容器并联的等效电容量为各电容量之和。

$$C_0 = C_1 + C_2$$

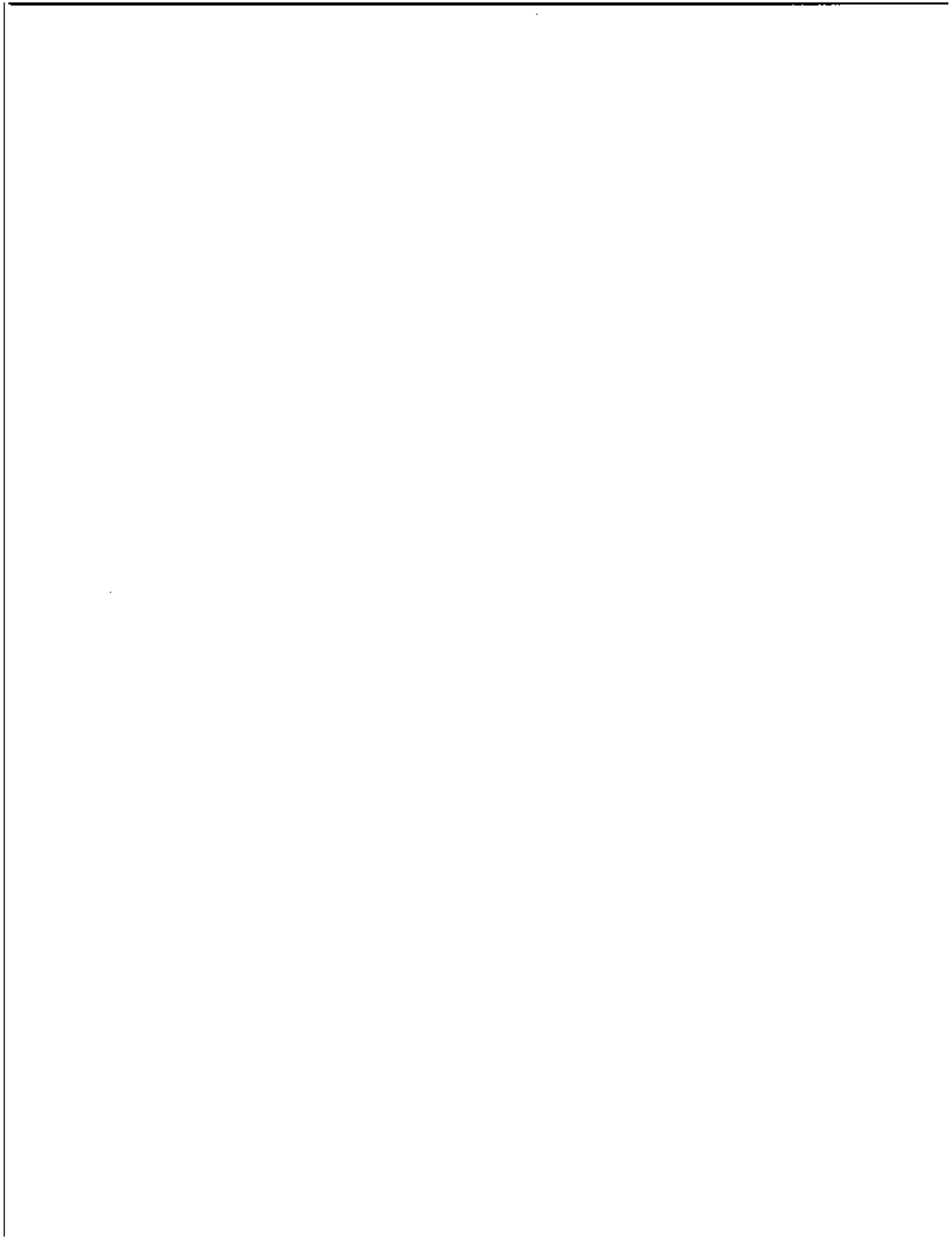
(2) 电容器串联的等效电容量为各电容量倒数之和的倒数。

$$C_0 = \frac{1}{1/C_1 + 1/C_2} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

### 电容器的电容量

$$C = \varepsilon(A/d)$$

( $C$ :电容量,  $\varepsilon$ :介电常数,  $A$ :相对的面积,  $d$ :距离)



# IV

## 交流电路

---

前面学习的主要是关于直流电路的内容,而电流大致可分为直流与交流两种,本章将涉及交流的内容。

火力、水力及原子能发电厂等所发的电经输配电线送至各家庭及工厂,作为主要的能源,这就是交流电。由于交流电能简单地利用变压器升压或降压,因此能够高效输送大功率的电能,并使洗衣机、吸尘器等家用电器中使用的电动机旋转。另外,收音机及电视机等作为信息传输媒体的电波或者电话的声音等,研究它们的性质后发现,这也是交流电。

在本章中,将学习交流电的性质及如何利用交流电等有关交流电的基础知识。

## 4.1 直流与交流的比较



图 4.1 直流电源

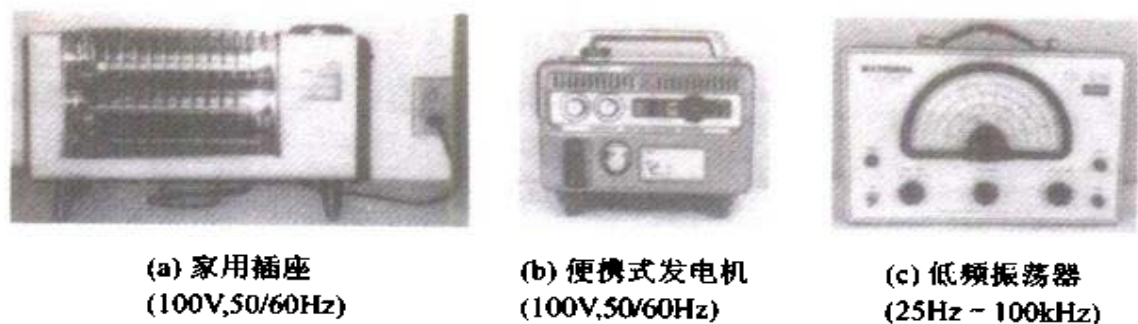


图 4.2 交流电源

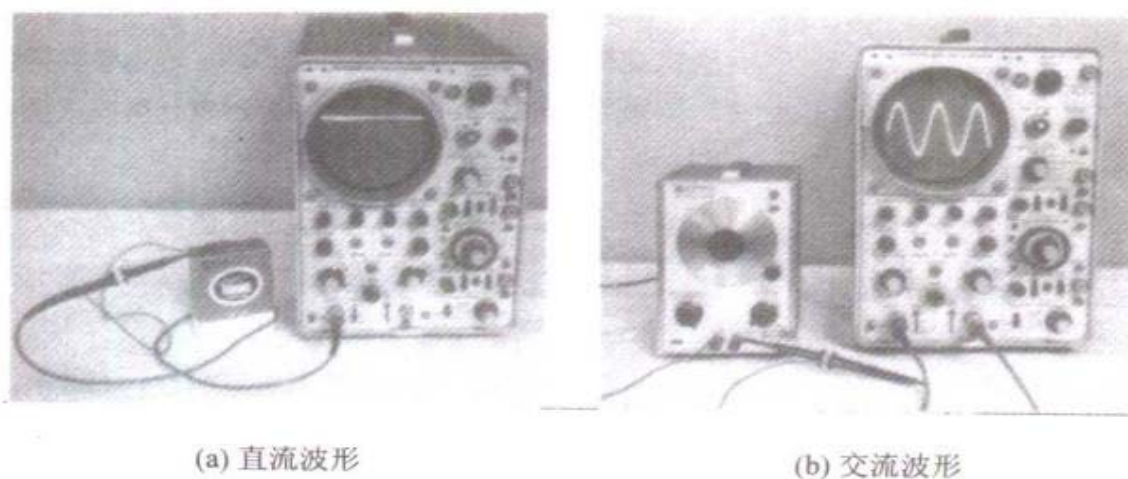


图 4.3 波形观测

### 4.1.1 身边的直流与交流

在现代社会中,电在所有领域广泛用作能源。电大致可分为直流电与交流电。我们身边见得很多,要根据其特点灵活加以应用。

图 4.1 所示为三种直流电源。有收录机及计算器等用的便于携带的干电池、模型飞机及汽车引擎起动等使用的蓄电池和在一定范围内能自由改变电压的直流电源装置等,由这些电源得到的电称为直流电。

图 4.2 所示为三种交流电源,有我们家庭用的电灯线的电源、便携式发电机和在一定范围内能自由改变频率的振荡器等,由这些电源得到的电称为交流电。

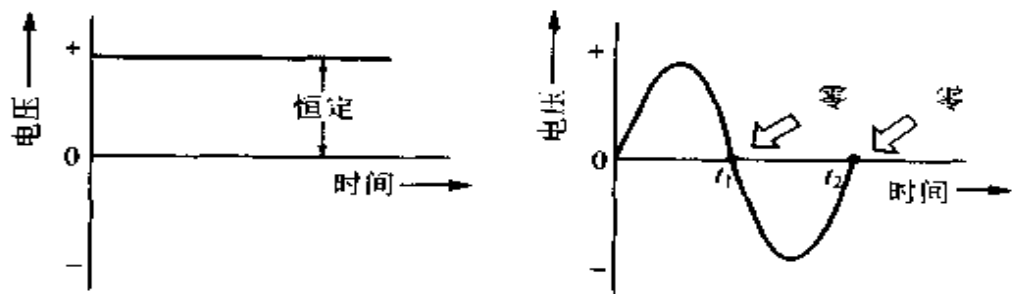
这样的直流与交流各具有什么样的性质呢?

### 4.1.2 直流与交流的性质

若用示波器观测该直流与交流的波形,可得图 4.3(a)、(b)所示完全不同的波形。

直流的大小相对于时间是恒定的,方向也不改变。如果以干电池而言,它的极性(正端与负端)是不变的,因而直流电方向也不变。而交流则与此不同,其大小及方向随时间作周期性变化,与直流相比,其变化比较复杂。所谓方向变化也就是表示极性的变化。

图 4.4 所示为直流与交流相对于时间的变化。



(a) 直流(与时间无关,大小恒定)

(b) 交流(大小及方向随时间而变)

图 4.4 直流与交流的波形

交流的变化比较复杂,只有灵活利用其特性,才能很好地应用各种电路及现象。这应该在学习交流的过程中不断地加以理解和掌握。

### 4.1.3 交流波形的正负与零

从干电池可知,直流电的正负极性是固定的。而交流电则与此不同,其大小随时间而变化,而且极性也随时间而变化,即具有正负极性随时间而交替的性质。

再有,极性由正变为负及由负变为正时,在正与负的交替处应该为零,在图 4.4 的交流波形中  $i_1$  及  $i_2$  所示的即为过零点。

送到我们家中的交流电也应该是这样变化的,下面以荧光灯的点灯状态为例来看交流电的变化情况。

荧光灯发出的光如图 4.5 所示,在  $i_1$  及  $i_3$  时发光,在  $i_2$  及  $i_4$  时熄灭。

即荧光灯要产生闪烁。这可以将手靠近荧光灯,然后左右摆动手来证明,这时可看见有若干个手指。从这个实验还可知道,当闪烁与摆动的快慢满足一定关系时,就可看成静止状态。

但是用该交流电作为电源的荧光灯仍可广泛用作一般照明。那是因为,人眼即使非常精巧,但若 1

秒钟闪烁 100 多次<sup>1)</sup>,则由于存在余辉现象,仍感觉到像用同样的亮度点灯一样。因此理论上是按交流波形不断亮灭,而实际上

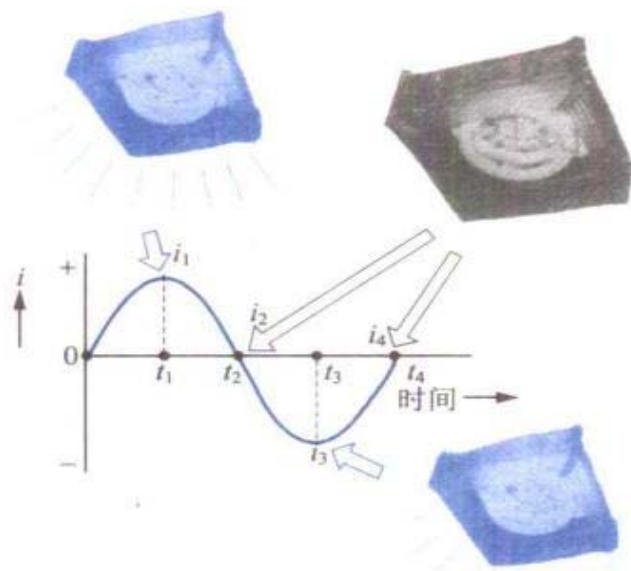


图 4.5 荧光灯与电流波形

1) 具体来讲,在东日本是每秒钟闪烁 100 次,在西日本是每秒钟闪烁 120 次。

是作为亮度与时间无关的光源使用。

电影与电视同样存在这种闪烁与人眼的关系。

银幕上放映的电影若静止来看是一张张画面,与幻灯片一样放映的是一幅幅静止的图像。若使该静止图像一点一点变化,利用人眼不能跟随快速运动的现象,即利用视觉滞留作用,看起来就像连续的画面一样。这就是电影的画面。

电视的情况是在显像管屏幕上从左上至右下(正好像读横排的书本一样)利用光的明暗生成画面,以每秒钟 60 幅的速度显示。这样利用视觉滞留作用,看起来就像连续的画面一样。与电影的不同点仅在于,电视画面在时间静止时,画面是以非常小的光点来表示明暗的。

#### 4.1.4 直流与交流的电源符号

由于直流(DC, Direct Current)与交流(AC, Alternating Current)的波形有很大不同,因此电源符号如图 4.6 所示。

直流由于大小及方向不随时间而变,所以使用大

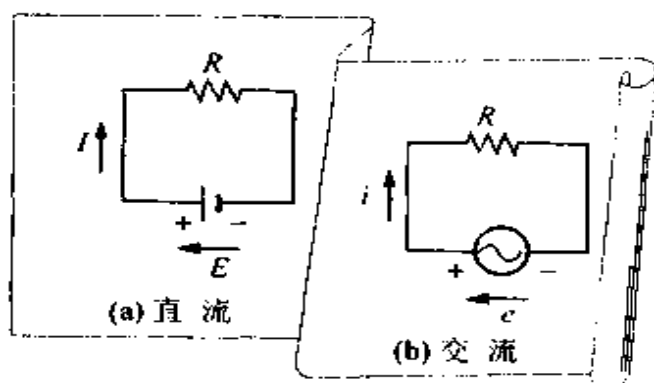


图 4.6 电源的符号与方向

写字母表示,电压用  $E$  表示,电流用  $I$  表示。电源方向一般用箭头表示,电流方向与该箭头方向相同。

而由于交流电压及电流的大小和方向随时间而变,因此使用小

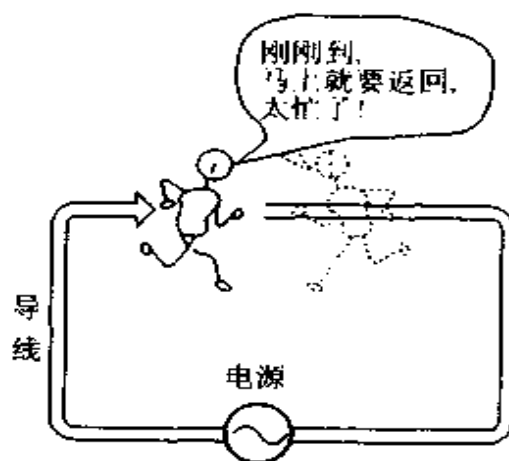


图 4.7 频繁来回流动的交流电  $i$

写字母,电压用  $e$  表示,电流用  $i$  表示。电源方向一般用箭头表示图 4.5 时间轴上面波形  $i_1$  (即正半波) 的方向即正方向。因而,时间轴下面的  $i_3$  为与电源箭头相反的反方向。



## 4.2 正弦交流的产生

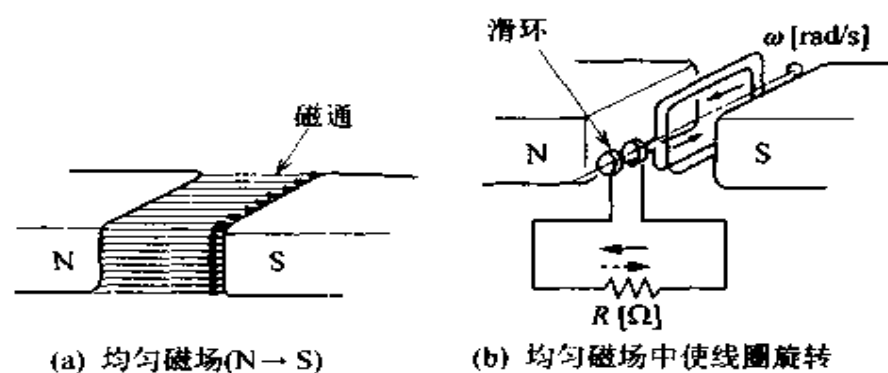


图 4.8 均匀磁场及线圈

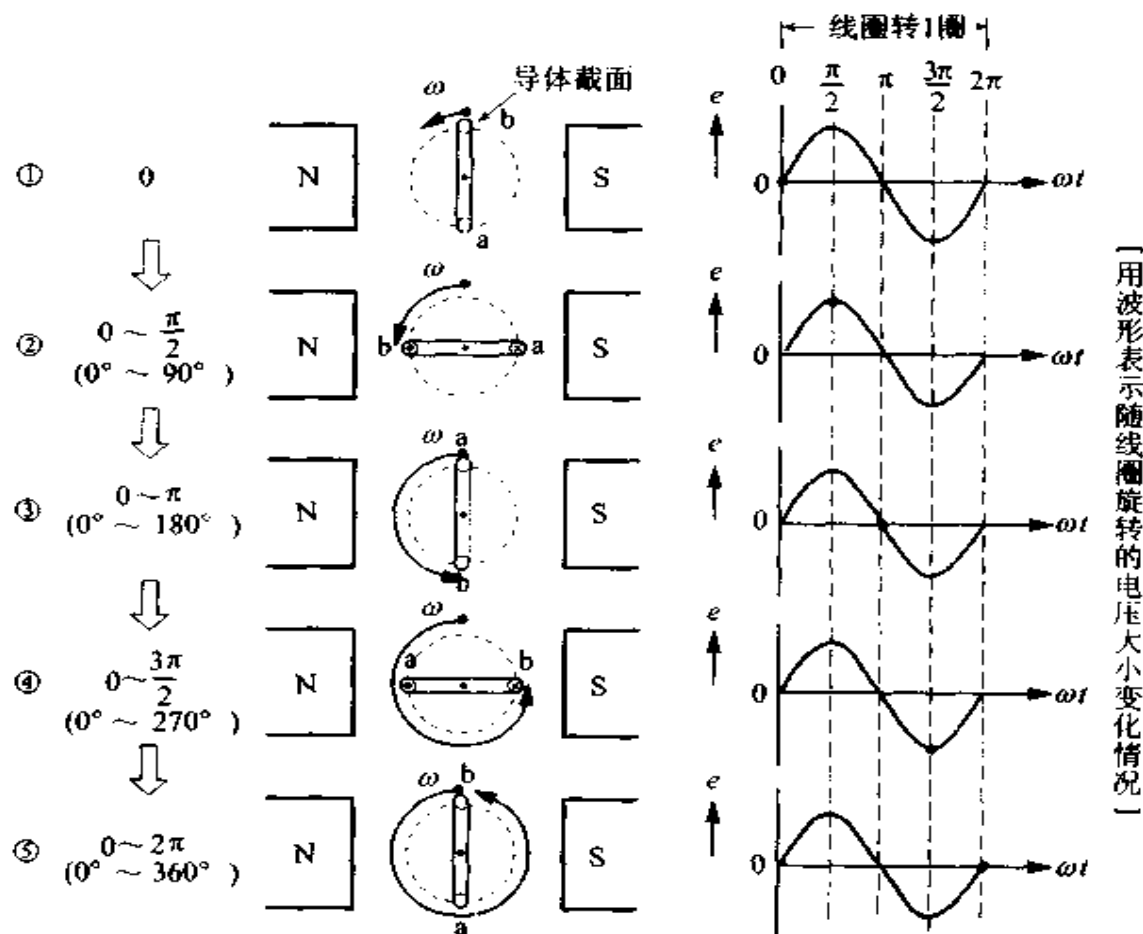


图 4.9 正弦交流的产生(因线圈位置不同而产生波形变化)

### 4.2.1 均匀磁场中线圈的移动

图 4.10 所示的装置是将绕成线圈状的导体置于均匀磁场中,在线圈两端连接检流计。

现在若用手将线圈左右摆动,则检流计的指针以零刻度位置作为中点左右摆动。若线圈快速摆动,则指针摆动加大,若慢慢摆动,则指针振幅减小。若线圈上下运动或静止,则指针均不摆动。

磁极间沿  $N \rightarrow S$  的方向有磁通通过,若导体不切割磁通,则不产生电动势。根据已经学习过的弗莱明右手定则说明的发电机原理可以知道,

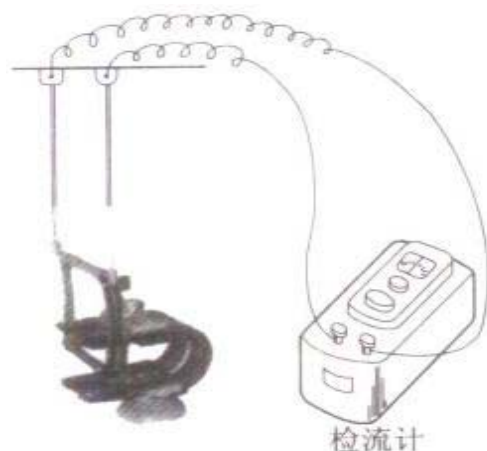


图 4.10 线圈的移动

由于在经过检流计的闭合电路中产生了电动势,因此有电流流过,使指针摆动。要使该摆动一直持续,只有始终使线圈移动,发电机就是应用了这一原理。

众所周知,我们家庭及工厂使用的交流电是使发电厂的发电机运转而产生的,即是将发电机与利用水力的水轮机或利用蒸汽的涡轮机等同轴安装,使发电机旋转而发电。

### 4.2.2 交流的产生

将线圈置于均匀磁场内,若以某一定速度旋转,则会产生什么样的电压?

(a) 流过线圈的电流方向改变 如图 4.11 所示,将线圈的  $a$  边和  $b$  边置于磁极之间,使其旋转切割磁通,这样在线圈导体中流过电流,下面用弗莱明右手定则来求该电流的方向。

在  $XY$  轴的左半边,流过线圈的电流方向如中指所指方向,是从纸里向外(用符号  $\odot$ )流,而相反在右半边,是从外向纸里(用符号  $\otimes$ )流。另外,线圈反时针方向旋转  $180^\circ$ ,仍然相同。但是就线圈的导体  $a$  及  $b$  来讲,流过导体  $b$  的电流方向从  $\odot \rightarrow \otimes$ ,而流过

导体 a 的电流方向从  $\otimes \rightarrow \odot$ , 方向发生变化。由此可知, 以 XY 轴为界, 流过线圈的电流反向。电流反向必然在中途有为零的时候。

这样, 若线圈在均匀磁场中旋转 1 圈, 考虑流过线圈导体的电流方向, 则电流变化过程为  $+ \rightarrow 0 \rightarrow - \rightarrow 0$ 。表 4.1 所示为线圈旋转 1 圈时的变化。

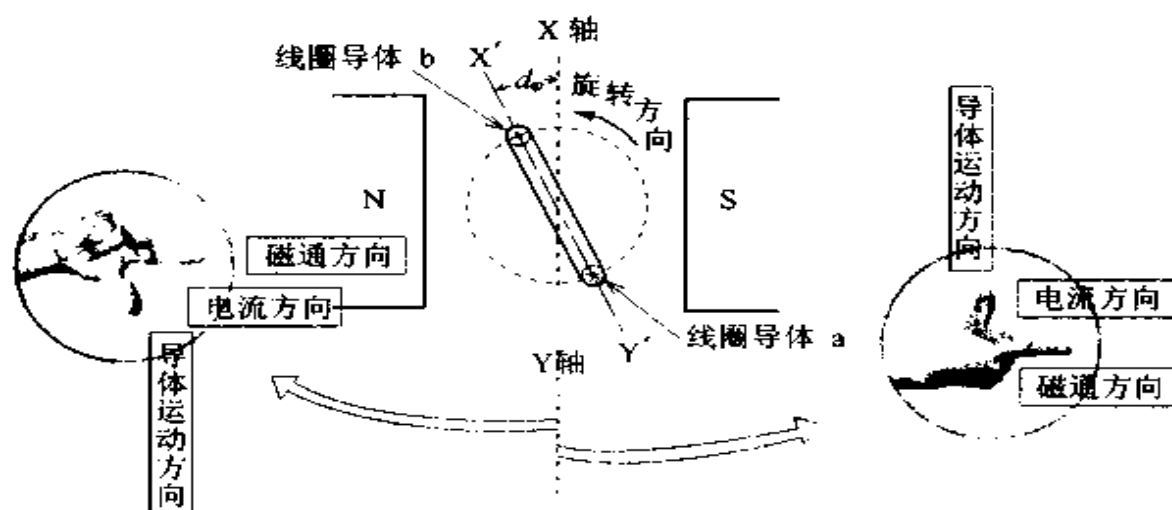


图 4.11 线圈位置与电流方向

表 4.1 流过线圈导体的电流方向(图 4.11 的状态)

线圈导体(b 边的位置)	XY 轴左侧	XY 轴上	XY 轴右侧
线圈导体 b 边	$\odot$	0	$\otimes$
线圈导体 a 边	$\otimes$	0	$\odot$

(b) 流过线圈的电流大小改变 前面已经学习了, 在均匀磁场中导体垂直切割磁通将产生电动势。在图 4.11 中, 旋转线圈的导体 a 及 b 不一定始终垂直切割从 N 极指向 S 极的磁通。

在图 4.12(a)的瞬间, 导体 a 及 b 如箭头所示, 一个向上, 一个向下, 但都可看成垂直于磁通运动。由于垂直切割磁通, 因此

产生的电动势最大,电流也是最大。

而图(b)则与图(a)不同,导体 a 及 b 一个向左,一个向右,可看成是水平运动,因而导体 a 及 b 垂直切割磁通的分量为零,所以电流也应该为零。

这样当线圈以一定速度旋转时,虽然导体 a 及 b 的线速度相同,但相对于磁通方向(N→S)都在变化,即导体 a 及 b 垂直切割磁通的分量因旋转角度(位置)而变化。所以,产生的电动势大小也因线圈位置而变化,电流也同样发生变化。

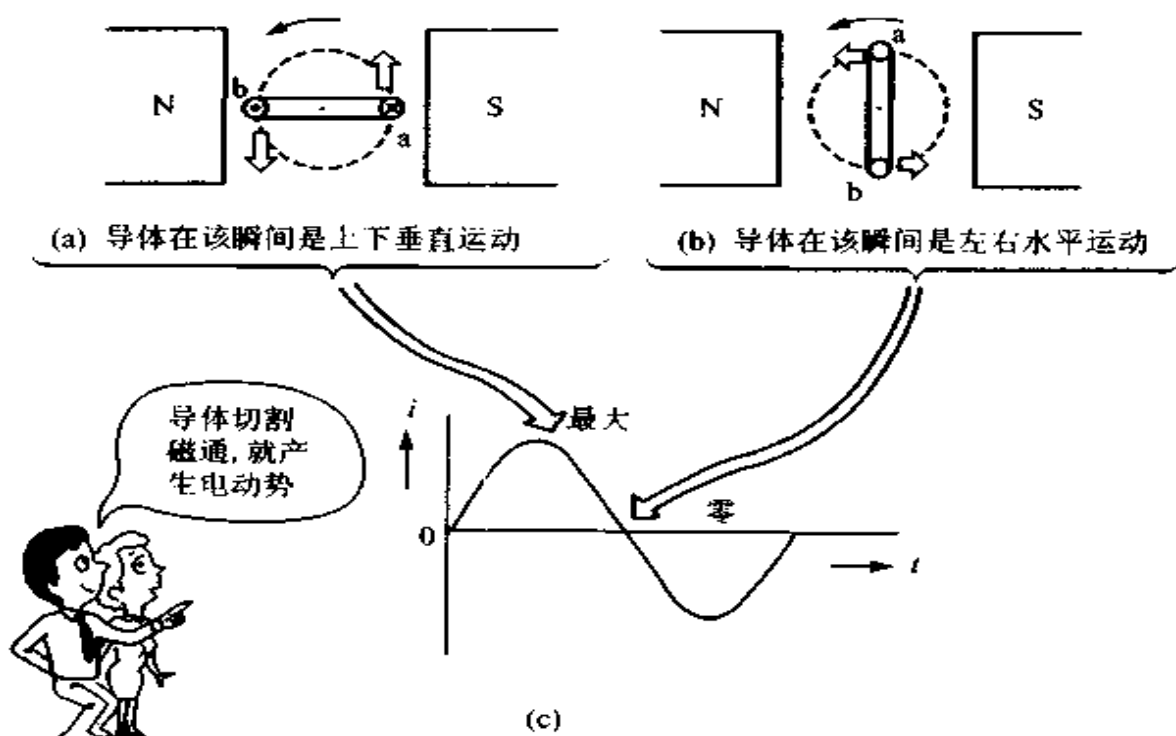


图 4.12 线圈位置与磁通的方向

#### 4.2.3 产生的电动势用 $\sin$ 表示

图 4.13 所示为线圈导体从 XY 轴旋转  $\varphi$  角时的位置。这时导体相对于磁通方向 N→S 是斜向切割。由于电动势与导体垂直切割磁通的分量与电动势成正比,因此在这种情况下,与颜色线

表示的分量即  $\sin\varphi$  的值成正比, 所以电动势  $e$  的大小为

$$e = E_m \sin\varphi \quad [\text{V}] \quad (1)$$

式中,  $E_m$  为最大值, 取决于线圈的大小、匝数、转速、NS 间的磁通密度等。

#### 4.2.4 正弦交流

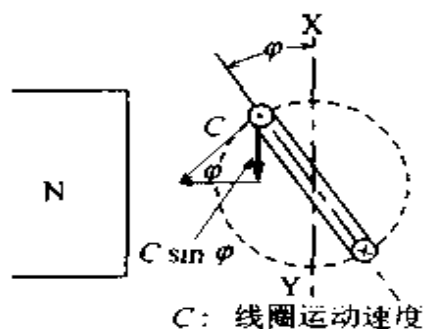


图 4.13 线圈垂直切割磁通的分量为  $\sin$  函数

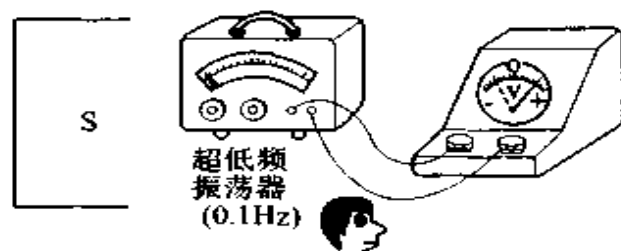


图 4.14 观察确认超低频振荡器的输出大小与方向随时间而变化

式(1)的交流为按  $\sin$  函数而变化的波形, 由于与数学上学习过的正弦波曲线一致, 因此称为正弦交流(参见图 4.15)。

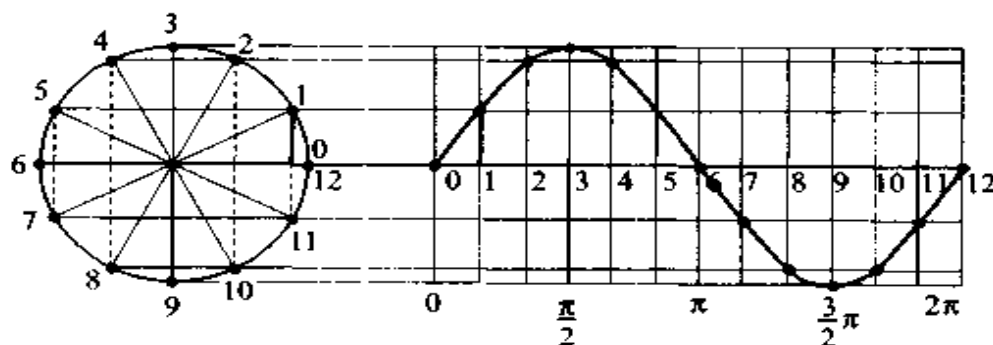


图 4.15 正弦波曲线

今后只要不特别事先说明,都作为正弦交流电压及电流。

#### 4.2.5 正弦波以外的波形

图 4.16 所示为若干个正弦波以外的波形。

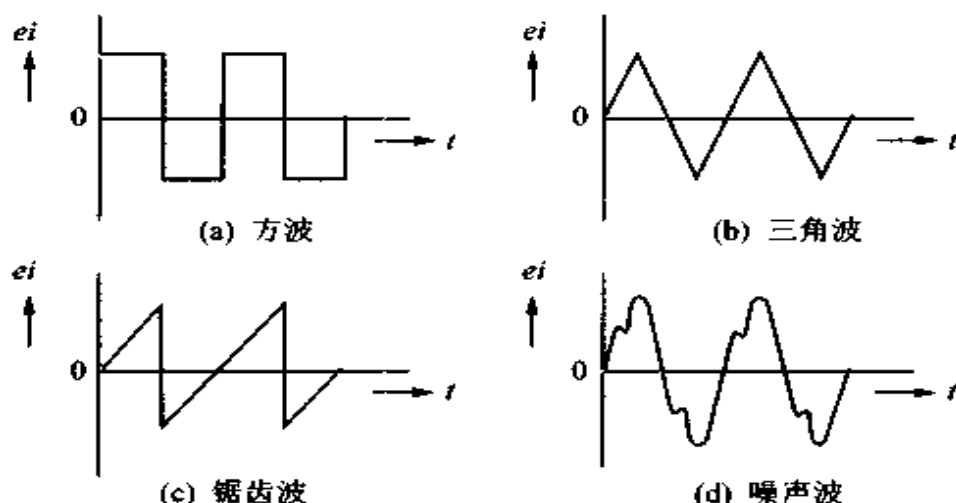


图 4.16 正弦波以外的波形

#### 4.2.6 速度与角速度

平面上的速度是用单位时间前进的距离来表示的,但如图 4.17(a)那样以  $O$  为中心进行圆周运动的线圈导体  $a$  及  $b$  还是以每秒钟前进几度来表示速度比较方便。角度可以用度表示,也可以用弧度(单位符号为  $\text{rad}$ )表示。

这样,1 秒钟旋转的角度称为角速度,一般用  $\omega [\text{rad/s}]$  表示。

如图 4.17(b)所示,当半径  $r$  与圆弧  $l$  的长度相等时,弧度为  $1\text{rad}$ 。也就是说,将圆周按半径来分割。因而,设旋转体旋转 1 周,其弧度为

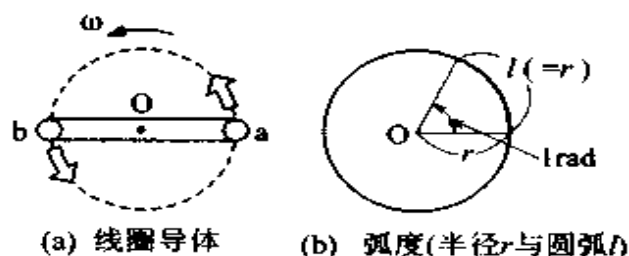


图 4.17 角度的表示方法

$$\frac{2\pi r(\text{圆周长})}{r(\text{半径})} = 2\pi \quad [\text{rad}]$$

若以每秒  $n$  转的恒定速度旋转, 则角速度为


$$\omega = 2\pi n \quad [\text{rad/s}] \quad (2)$$

在由一对 N 极与 S 极形成的均匀磁场中, 使线圈导体旋转产生的交流是线圈导体每旋转 1 周而重复变化一次, 因而每秒变化数与其转速一致。这样应该可以用频率(将在后述) $f$  置换式(2)的转速  $n$ , 角速度可表示为

$$\omega = 2\pi f \quad [\text{rad/s}]$$

表 4.2 所示为弧度与度的关系, 在有关电的计算中, 多采用弧度来表示角度, 这是因为其表示方便、容易记忆且计算简单。

表 4.2 弧度与度

弧 度	$2\pi$		$\pi$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{6}$
度	360		180	120	90	60	45	30

## 4.3 正弦交流电的表示方法

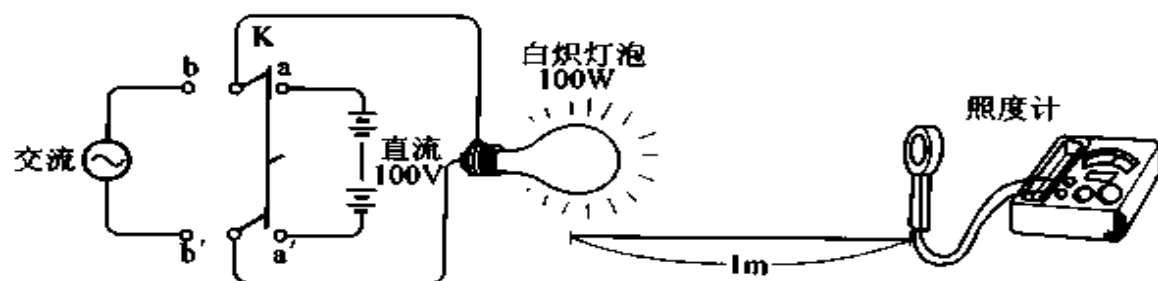


图 4.18 用直流及交流电源使白炽灯泡点灯

表4.3 白炽灯泡的点灯数据

	将开关K倒向aa'侧 (直流电源)	将开关K倒向bb'侧 (交流电源)
同样 照度		
功	如果照度相同, 则直流与交流做同样的功	
波 形		

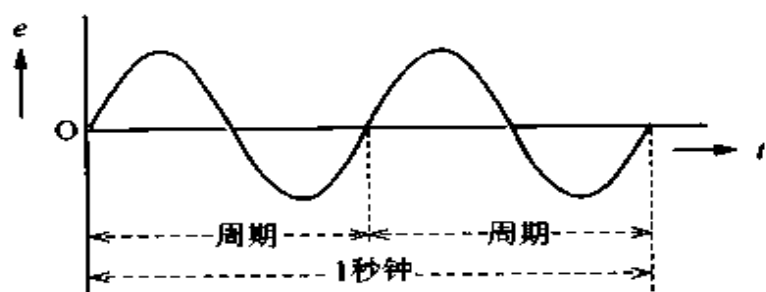
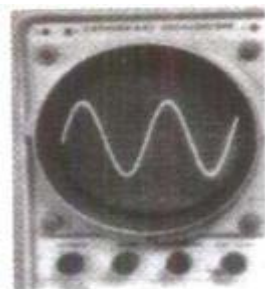


图 4.19 便携式照度计



**所谓有效值:**用直流与交流电源使同样的白炽灯泡点灯,并使其照度相同。这时的波形如表 4.3 所示,交流的最大值为  $1.41\text{A}$ 。但是,不是用  $1.41\text{A}$  表示该交流,而因为与  $1\text{A}$  的直流做了同样的功,因此用  $1\text{A}$  表示,这称为有效值(参见本章 4.3.4 小节)。

无论交流还是直流,做相同的功就用同样大小来表示。这样有效值定义的表达方法虽然稍微复杂了一点,但是,用有效值来处理及计算交流可以与直流的情况相同,因此是非常方便的。

(a)  $2\text{Hz}$  的波形

(b) 示波管屏幕上的交流波形

图 4.20 交流波形

#### 4.3.1 频率与周期

由于交流的大小及方向都随时间而变,因此不能像直流那样简单地表示。它有各种表示方法。

一种是用波形来描绘其变化情况,横轴为时间,纵轴表示大小及方向。波形不适宜用它直接进行电路计算,也不适宜画成图形符号,但随时间变化的情况却能一目了然。

在图 4.20(a)所示的波形中,重复变化一次的时间称为周期(符号为  $T$ ),单位用秒  $[\text{s}]$  表示,另外,单位时间(1 秒钟)重复变化的次数称为频率(符号  $f$ ),单位用赫兹  $[\text{Hz}]$  表示。 $f$  与  $T$  之间有下列关系:

表 4.4 频率举例

频率种类	频 率
声 音	20 ~ 20 000 Hz
工 频*	50/60Hz
无线电波(中波)	535 ~ 1 605kHz
电视电波(VHF)	90 ~ 222 MHz

\* 家庭及工厂等使用的交流频率

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}]$$

$$T = \frac{1}{f} \quad [\text{s}]$$

图 4.20(a) 的频率, 由于 1 秒钟重复变化两次, 因此为 2Hz, 而周期为 0.5s。

表 4.4 所示为一些频率的例子。

### 4.3.2 瞬时值与最大值

如前述波形所示, 交流的大小随时间而变化。某瞬间所具有的大小称为瞬时值。例如, 在图 4.21 中,  $e_0 \sim e_8$  为瞬时值, 是使时间处于静止状态而显示的大小。

由于横轴的时间是任意无穷多的数, 因此瞬时值也存在无数个, 波形可以说是该无数个瞬时值连接而成的。

最大值是该瞬时值中最大的值。在正弦交流电的 1/2 周期中, 必定有一个最大值(图 4.21)。

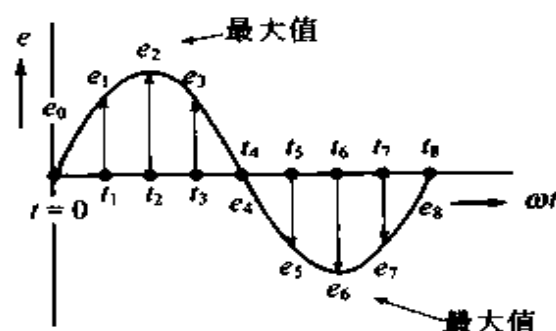


图 4.21 瞬时值与最大值

**最大值:** 由于其大小不随时间而变, 因此用大写字母表示, 电压用  $E_m$  表示, 电流用  $I_m$  表示。下角的 m 表示 maximum value 的意思。

### 4.3.3 平均值表示

表示交流大小的一个方法是用平均值。若将交流波形对一个周期进行平均, 由于各半周期的波形大小相等, 因此这样平均

的结果为零。所以可以考虑对  $1/2$  周期求平均值。若近似求平均值,则如图 4.22 所示( $\sin 10^\circ = 0.1736$ ,  $\sin 30^\circ = 0.5000$  等)

**平均值:** 由于其大小不随时间而变,因此用大写字母表示,电压用  $E_{av}$  表示,电流用  $I_{av}$  表示。

平均值与最大值的关系如下所示:

$$E_{av} = \frac{2}{\pi} E_m = 0.637 E_m \quad [V]$$

$$I_{av} = \frac{2}{\pi} I_m = 0.637 I_m \quad [A]$$

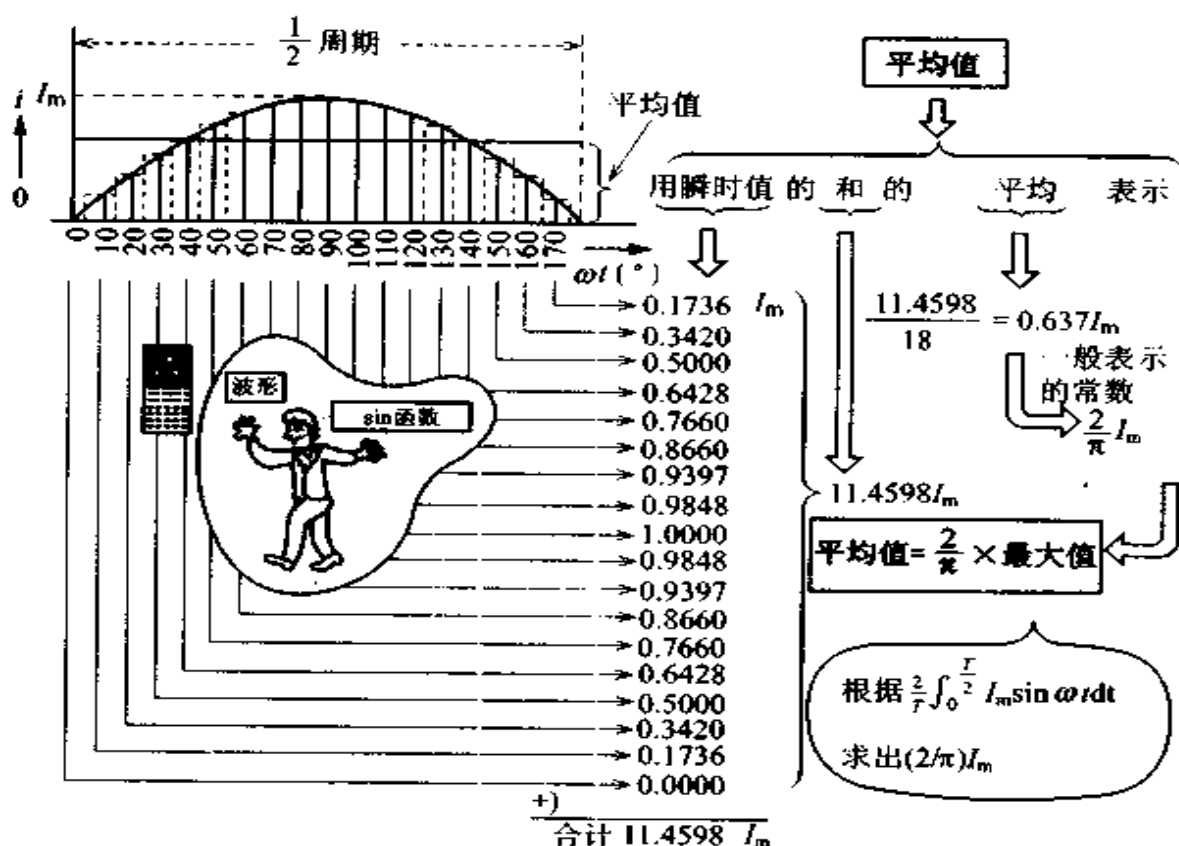


图 4.22 平均值的考虑方法与近似计算

## 4.3.4 一般用有效值表示电压及电流

例如,我们家庭的交流电压为 100V (日本的额定电压为 100V——译注),流过的电流为 20A 等,这些都是用有效值表示的。

若用有效值表示,则交流的处理及计算与前面学习过的直流情况相同,因此一般在交流中用有效值表示电压及电流。

同样时间内电阻  $R[\Omega]$  产生的热量,直流及交流都相同,有效值是根据实际效果为基础来考虑的,如图 4.23 所示。

## • 有效值的考虑方法

$$\text{直流功率} \quad P_{\text{DC}} = I^2 R \quad [\text{W}] \quad (1)$$

$$\text{交流功率} \quad P_{\text{AC}} = (i^2 R \text{ 的平均值}) [\text{W}] \quad (2)$$

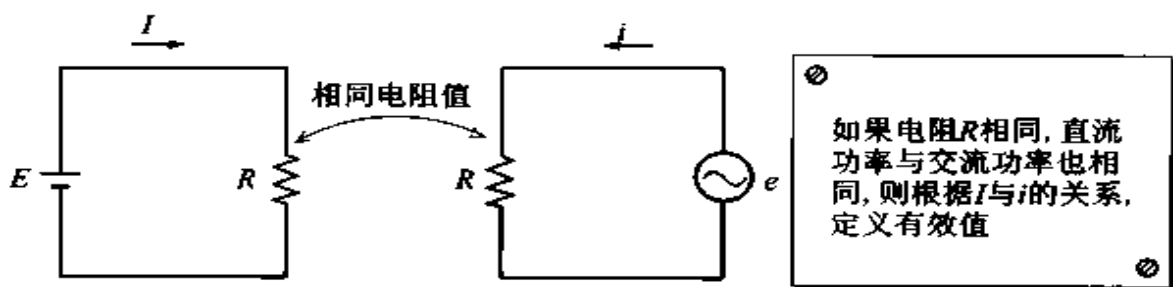


图 4.23 直流与交流的功率及有效值

令式(1)及式(2)的右边相等,求电流  $I$ ,则得下述结果,即用右边的内容  $I$  表示交流,这应该就是有效值。

$$I = \sqrt{i^2 \text{ 的平均}} \quad [\text{A}]$$

**有效值:** 定义为瞬时值的平方的平均的平方根(方均根),若这样表示,由于其大小可以不随时间而变,因此用大写字母表示,电压用  $E$  表示,电流用  $I$  表示,不附加下角。

有效值与最大值的关系如下所示:

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{1}{\sqrt{2}} E_m = 0.707 E_m \quad [\text{V}] \\ I &= \frac{1}{\sqrt{2}} I_m = 0.707 I_m \quad [\text{A}] \end{aligned} \right\}$$

有效值是对一个周期进行定义的,但如图 4.24 的小圆内所示的那样,是相同波形重复,因此对  $1/2$  周期进行近似计算,则如图 4.24 所示。

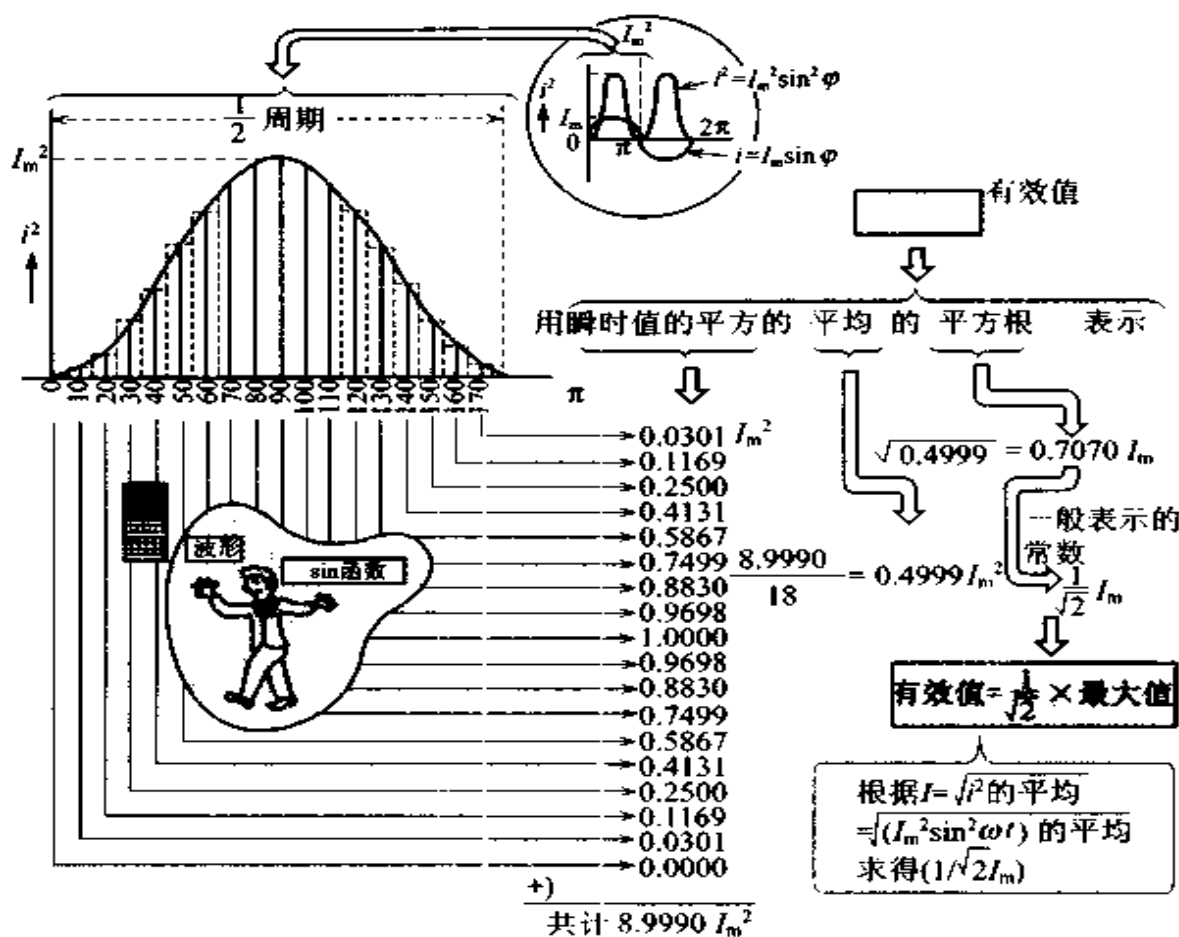


图 4.24 有效值的考虑方法与近似计算

#### 4.3.5 角频率与电角度

利用一对 NS 极产生的正弦交流电,是线圈旋转一周重复变化一次。因而,每秒钟重复变化的次数与线圈的转速一致,因此

可以表示如下,这也称为角频率。

$$\omega = 2\pi f \quad [\text{rad/s}]$$

下面来研究一下该角频率与磁极数的关系。图 4.25①是线圈旋转一圈与正弦交流电的变化次数一致,而如②及③那样,若增加磁极数,则变为不一致。线圈物理上旋转一圈的角度称为空间角度,而交流电变化一周的角度称为电角度,若磁极数增加,则两者不一致。图 4.25 所示为它们的变化情况。

频率因磁极数不同而不同,在电气领域中,是以产生一次变化(一个周期)为基准规定为  $2\pi[\text{rad}]$ 。

因而,③是①的频率的三倍,电角度为  $6\pi[\text{rad}]$ 。

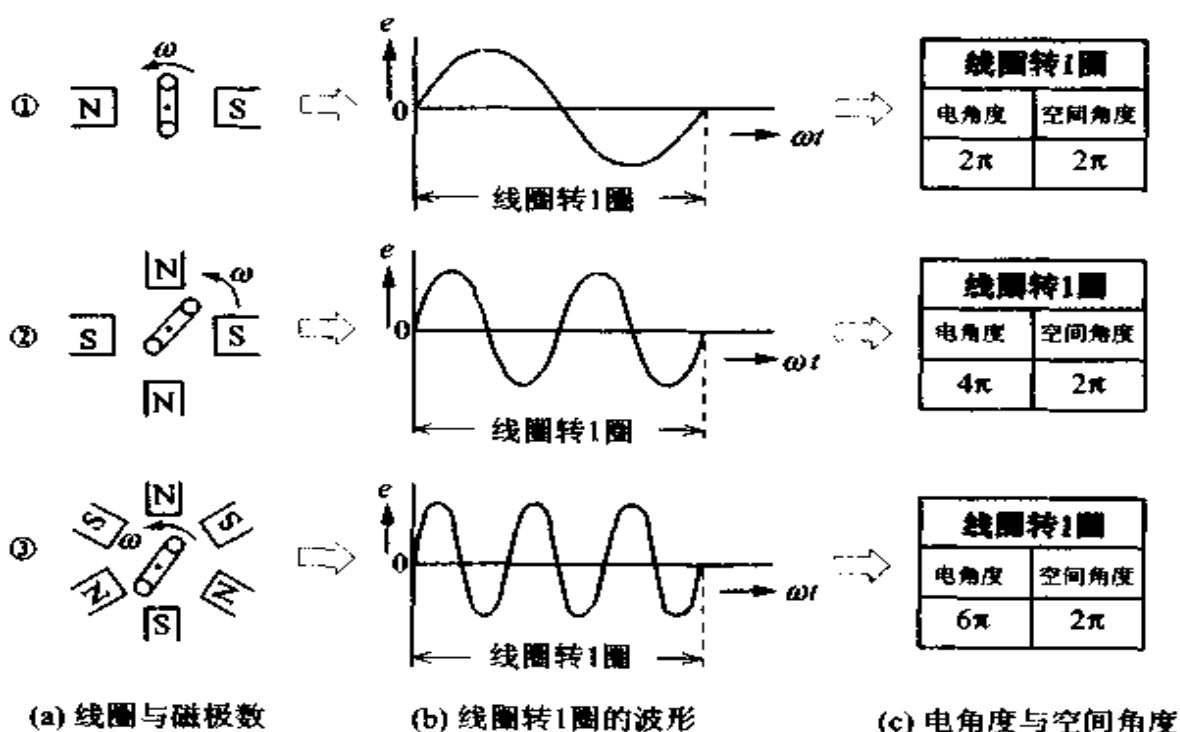


图 4.25 磁极数与电角度及空间角度

## 4.4 相 位

### 观测有相位差的波形

#### ● RC串联电路的端电压

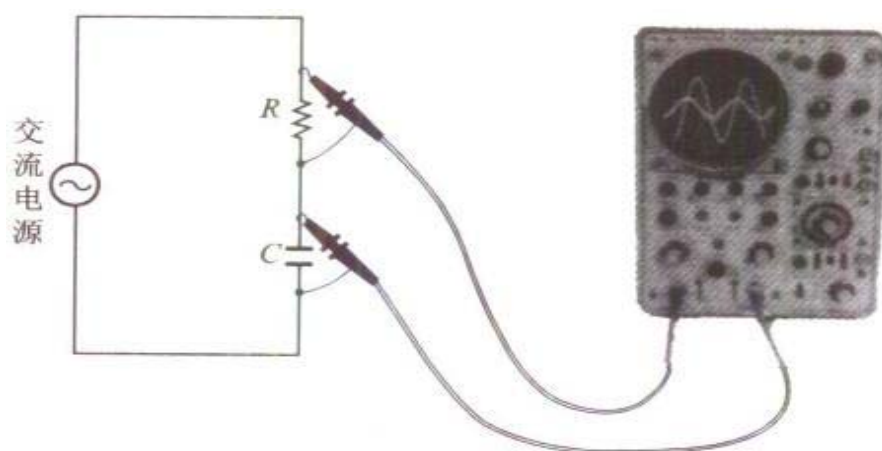


图 4.26  $R$  与  $C$  的端电压波形

#### ● 两组线圈产生的电压

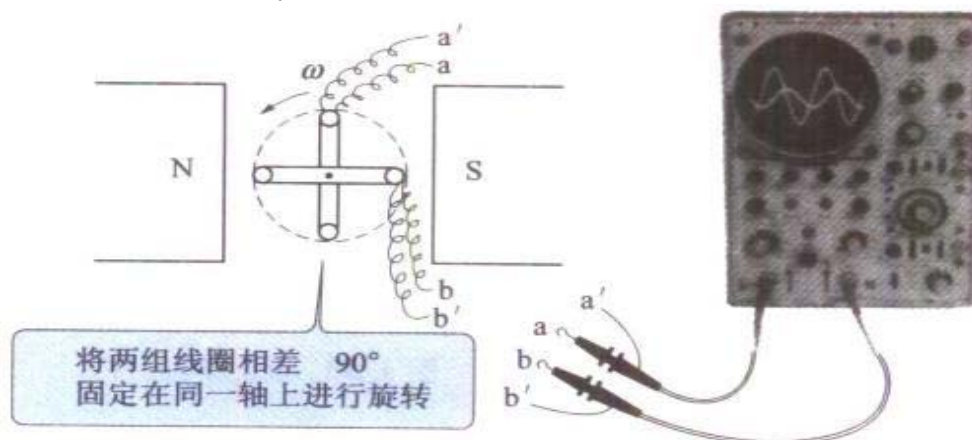


图 4.27 两组线圈的波形

### 4.4.1 所谓相位

若用辞典查相位这一术语可知,相位是表示周期运动中处于什么状态及位置的一个量。

交流电压波形及电流波形也是随时间作周期性变化。图 4.28 的时间  $t_1$  的瞬间,波形处于什么样的位置,这就要用相位这一术语来表示。因而,相位是用距离某一起点( $t=0$ )的角度来表示,当然也可以用时间来表示,但一般由于用电角度表示比较方便,因此用  $\varphi$  或  $\theta$  等表示。

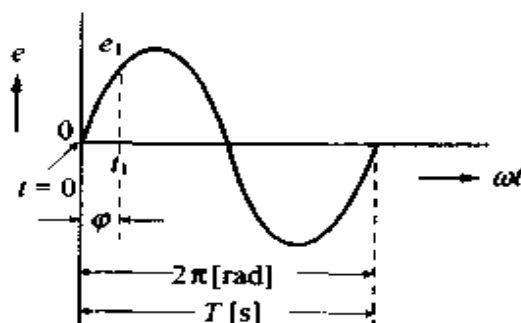


图 4.28

### 4.4.2 $e$ 与 $i$ 的相位差

图 4.29 所示为电压  $e$  与电流  $i$  有时间差。该  $e$  与  $i$  的相位各不相同,将相位之差  $\varphi$  称为相位差。

在对两个以上交流进行比较时,其交流的频率必须相同。在图 4.29 中,任何位置(时间)的相位差  $\varphi$  总是一定的。如果频率不同,则相位差将随时间而变,就无法对其进行讨论了。

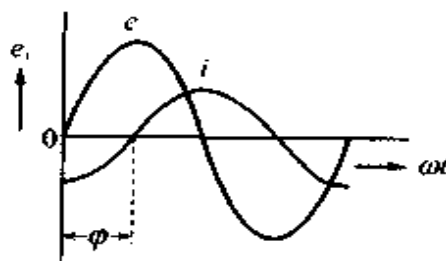


图 4.29 相位差( $\varphi = \pi/2$ )

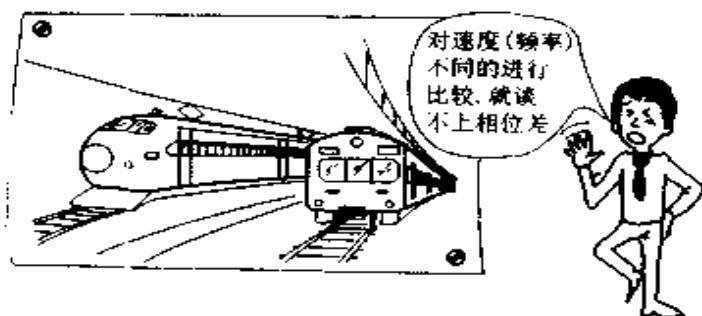
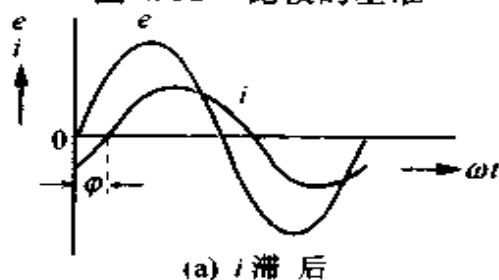


图 4.30 比较的条件

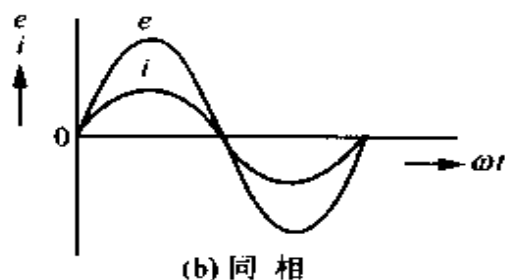




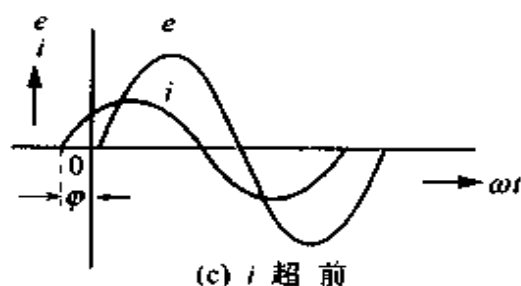
图 4.31 比较的基准



- (a)  $e$  超前于  $i$  相位角  $\varphi$  [rad] (以  $i$  为基准)。  
 $i$  滞后于  $e$  相位角  $\varphi$  [rad] (以  $e$  为基准)。



- (b) 相位差为零称为同相,  $e$  与  $i$  在同一瞬间为零, 在同一瞬间为最大。



- (c)  $i$  超前于  $e$  相位角  $\varphi$  [rad] (以  $e$  为基准)。  
 $e$  滞后于  $i$  相位角  $\varphi$  [rad] (以  $i$  为基准)。

图 4.32 相位的表示方法

### 4.4.3 相位超前与滞后

一般在讨论超前及滞后时,取决于以什么为基准,其表现也不一样。即所取的基准不同,超前与滞后会反过来。例如如图 4.31 所示来比较身高,若以 A 为基准,则 B 为矮;若以 B 为基准,则 A 为高。两者意思是一样的,但说起来就为低或高,表现就不一样。

相位的超前与滞后也相同,必须明确规定基准。

相位的超前与滞后:如图 4.32 所示,以时间轴为基准,来看波形的上升部分,处于左边为超前,处于右边为滞后。

#### 4.4.4 瞬时表达式与相位

用瞬时表达式表示相位时,令时间  $t=0$  来考虑比较容易懂。若这时为  $+\varphi$ ,即为超前,若这时为  $-\varphi$ ,即为滞后。

用瞬时表达式表示图 4.32 (a)、(b)、(c) 的波形,则如下所示:

以电压为基准  $e = \sqrt{2}E \sin \omega t$  [V]

(a) 的电流  $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi)$  [A]

(b) 的电流  $i = \sqrt{2}I \sin \omega t$  [A]

(c) 的电流  $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t \underbrace{+\varphi}_{\text{相位}})$  [A]

例如,来看  $t=0$  时的  $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \varphi)$  所示的电流,则  $\omega t$  这一项为零。这时上式为  $i = \sqrt{2}I \sin \varphi$ ,表示  $t=0$  时  $i$  的值。 $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi)$  也一样,都是表示图 4.33 中颜色线的值。

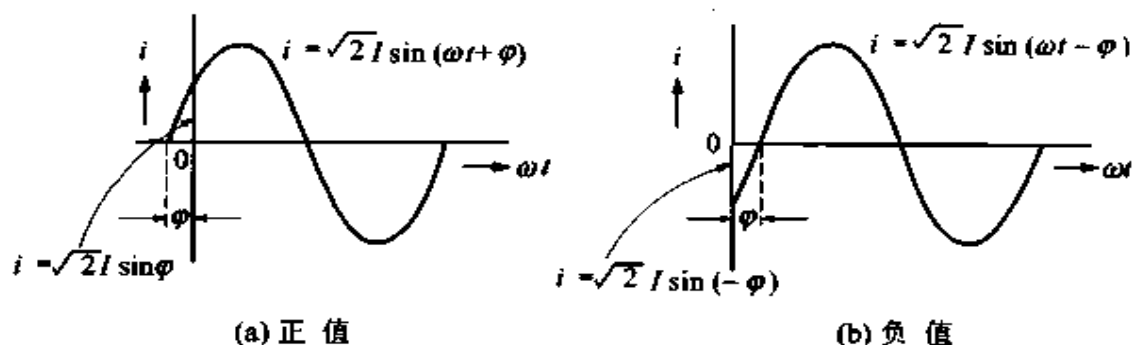


图 4.33  $t=0$  的值

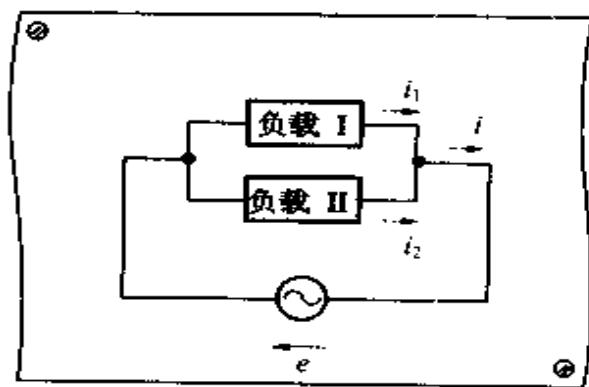
**例 4-1** 有一个用  $i = \sqrt{2} \times 10 \sin(\omega t - \pi/6)$  表示的电流, 求  $t = 0$  的瞬时值。

**解答:** 由于  $t = 0$ , 因此式中  $\omega t = 0$ , 上式就变成  $i = \sqrt{2} \times 10 \sin(-\pi/6)$ , 所以

$$i = \sqrt{2} \times 10 \times \left(-\frac{1}{2}\right) = -5\sqrt{2} \text{ A}$$

—— 瞬时值为  $-5\sqrt{2} \text{ A}$

## 4.5 用矢量及复数表示交流



$$\text{设 } i_1 = \sqrt{2} \times 10 \sin \omega t$$

$$i_2 = \sqrt{2} \times 10 \sin(\omega t + \frac{\pi}{3})$$

则  $i_1$  与  $i_2$  的和  $i$  等于多少?



$i_1$  与  $i_2$  的合成

	利用瞬时表达式	利用矢量	利用复数
方 法	$i = i_1 + i_2$ $= \sqrt{2} \times 10 \sin \omega t$ $+ \sqrt{2} \times 10 \sin(\omega t + \frac{\pi}{3})$		$i = i_1 + i_2$ $= 10 + (5 + j5\sqrt{3})$ $= 15 + j5\sqrt{3}$
评 价	<p>利用三角函数式展开进行计算求和, 即使只是求和已经很麻烦了!</p>	<p>根据矢量利用几何作图求和, 比较容易求解</p>	<p>分成实数和虚数求和, 因此很简单</p>

图 4.34  $i_1$  与  $i_2$  之和

### 4.5.1 电流 $i_1$ 与 $i_2$ 的合成

在求两个电流  $i_1$  与  $i_2$  之和时,对于直流情况,只要简单地求和即可,但大小及方向随时间作周期性变化的交流还有相位关系,因此不能这么简单处理。下面将两个电流  $i_1$  与  $i_2$  利用瞬时表达式、波形、矢量、复数四种方法来求和。它们各自具有特点,而且也都是电路计算的基础,因此希望读者要充分理解这些内容。

作为具体例子,考虑图 4.34 的  $i_1$  与  $i_2$  值为如下所示的电流:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \sqrt{2} \times 10 \sin \omega t \quad [\text{A}] \\ i_2 &= \sqrt{2} \times 10 \sin(\omega t + \frac{\pi}{3}) \quad [\text{A}] \end{aligned} \right\}$$

(有效值为 10A)

### 4.5.2 利用瞬时表达式进行合成

$$\begin{aligned} i &= i_1 + i_2 = \sqrt{2} \times 10 \sin \omega t + \sqrt{2} \times 10 \sin(\omega t + 60^\circ)^{1)} \\ &= \sqrt{2} \times 10 \sin \omega t + \sqrt{2} \times 10 (\sin \omega t \cos 60^\circ + \cos \omega t \sin 60^\circ) \\ &= \sqrt{2} (10 \sin \omega t + 5 \sin \omega t + 5 \sqrt{3} \cos \omega t) \\ &= \sqrt{2} (15 \sin \omega t + 5 \sqrt{3} \cos \omega t) \\ &= \sqrt{2} \times \sqrt{15^2 + (5\sqrt{3})^2} \sin(\omega t + 30^\circ) \\ &= \sqrt{2} \times 17.32 \sin(\omega t + 30^\circ) \end{aligned} \quad (1)$$

根据上式结果,  $i_1$  与  $i_2$  的合成电流是有效值为 17.32、相位超前  $30^\circ$  的正弦交流电。在计算过程中,需要三角函数公式及比较麻烦的计算,但通过数学式的计算仍能够求出结果。

1)  $\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta$  ( $\alpha \rightarrow \omega t, \beta \rightarrow 60^\circ$  加以展开)

表 4.5  $i_1, i_2, i$  的瞬时值

$\omega t$ [°]	瞬 时 值		
	$i_1$ [A]	$i_2$ [A]	$i$ [A]
	$\times \sqrt{2}$	$\times \sqrt{2}$	$\times \sqrt{2}$
0	0.00	+8.66	+8.66
30	+5.00	+10.00	+15.00
60	+8.66	+8.66	+17.32
90	+10.00	+5.00	+15.00
120	+8.66	0.00	+8.66
150	+5.00	-5.00	0.00
180	0.00	-8.66	-8.66
210	-5.00	-10.00	-15.00
240	-8.66	-8.66	-17.32
270	-10.00	-5.00	-15.00
300	-8.66	0.00	-8.66
330	-5.00	+5.00	0.00
360	0.00	+8.66	+8.66

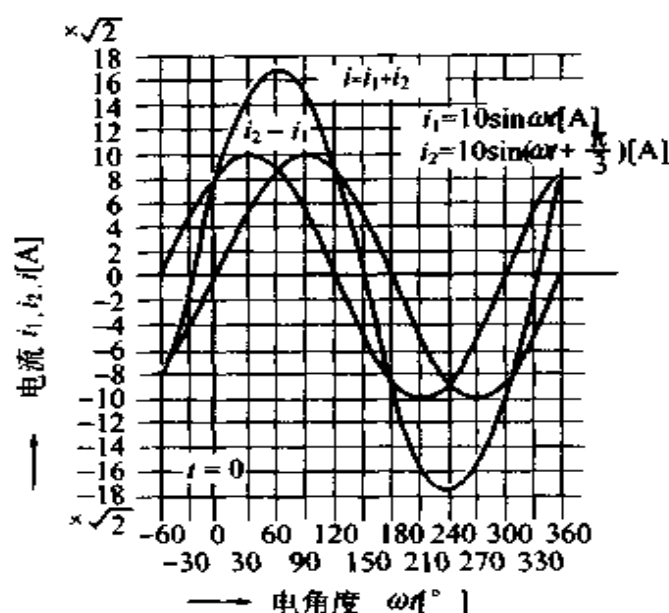


图 4.35 波形的合成

### 4.5.3 利用波形进行合成

只要取出  $i_1$  及  $i_2$  各瞬时值,再求其和即可,这里如表 4.5 所示,根据 13 点的值可以画出图 4.35 的波形。

但是,实际上问题在于,这样的合成太麻烦,而且仅仅求两个电流之和就这样费神。另外,波形合成的结果很难判断与利用前述瞬时表达式求出的合成结果相同。虽然它的优点是对于整个波形的形状能一目了然,但必须经过表 4.5 所示的步骤。

将利用瞬时表达式的合成结果  $i = \sqrt{2} \times 17.32 \sin(\omega t + 30^\circ)$  [A] 与波形相比,最大值  $17.32 \times \sqrt{2}$  出现在横轴  $60^\circ$  ( $240^\circ$ ) 的地方,也可以看出,以  $t=0$  作为时间起点,它具有超前  $30^\circ$  的相位。另外还可知道,  $i_1$  与  $i_2$  之和的  $i$  也是正弦交流。

### 4.5.4 矢量表示

(a) 矢量 在前面学习交流产生时已知,交流可以用正弦曲

线来表示。因此反过来,可以用直角坐标上的半径  $OP$  以角速度  $\omega$  旋转的表示方法,这种考虑方法就是矢量表示。

矢量具有大小及方向,仅表示大小时,将其称为模  $A$ ,将从基准轴  $X$  逆时针旋转的方向作为正方向,将该旋转角称为辐角。下面将  $i_1 = \sqrt{2} \times 10 \sin(\omega t + 60^\circ)$  与该矢量加以对应,可得

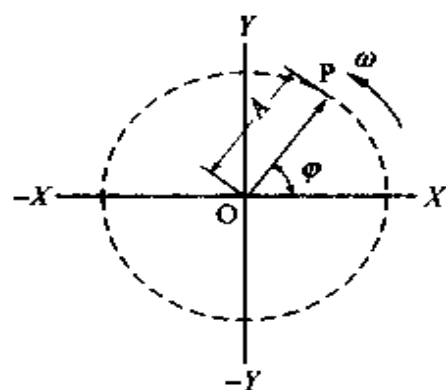


图 4.36 矢量图

有效值  $10 \rightarrow$  模  $A$  (或  $OP$ )  
相位  $60^\circ \rightarrow$  辐角  $\varphi$

这样,就能同样表示正弦交流电的内容。

(b) 利用矢量进行合成 由于能用矢量表示用瞬时表达式表示的交流,因此下面试用矢量进行合成。

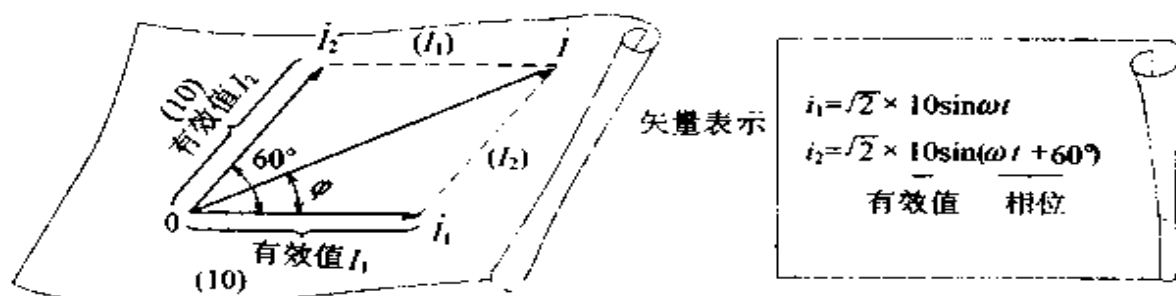


图 4.37 利用矢量进行合成

为了求得矢量和,将  $I_2$  的矢量向右平移至  $I_1$  的端部,再将  $O$  点与平移的  $I_2$  矢量的端部连接,得到矢量和  $I$ 。换句话说,使  $I_1$  及  $I_2$  矢量平行移动形成以  $I_1$  及  $I_2$  为两边的平行四边形,再从点  $O$  画一条对角线,即为矢量和。

由于  $I_1$  及  $I_2$  都用有效值表示,因此  $I$  也为有效值。 $I$  与  $I_1$  (基准轴) 的夹角  $\varphi$  应该为相位角,合成结果的有效值及相位的数值必须用带刻度的尺及量角器测量才能知道。

由于矢量是通过几何作图求得的,因此比利用几个波形进行合成要简单,但很难直接从矢量图求得数值。然而,可以根据矢量图再通过计算来求得有效值及相位。

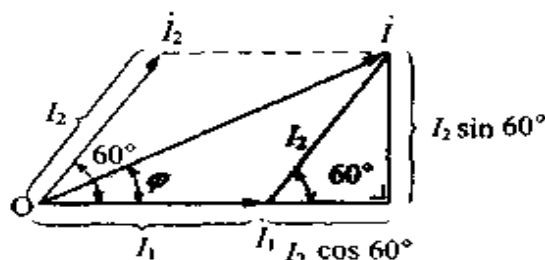


图 4.38 矢量计算

### (c) 根据矢量图进行计算

如图 4.38 所示,从  $I$  的端部向下对  $X$  轴作一条垂线,根据勾股定理从有颜色的直角三角形求得  $I$  的有效值,再利用三角函数求出相位角  $\varphi$ 。

合成有效值

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{(I_1 + I_2 \cos 60^\circ)^2 + (I_2 \sin 60^\circ)^2} \\ &= \sqrt{\left(10 + 10 \times \frac{1}{2}\right)^2 + \left(10 \times \frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2} \\ &= \sqrt{15^2 + (5\sqrt{3})^2} \\ &= 10\sqrt{3} = 17.32 \text{ A} \end{aligned}$$

合成辐角(相位)

$$\begin{aligned} \varphi &= \tan^{-1} \frac{I_2 \sin 60^\circ}{I_1 + I_2 \cos 60^\circ} \\ &= \tan^{-1} \frac{5\sqrt{3}}{15} = \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{3}} \\ &= 30^\circ \left( \text{或} \frac{\pi}{6} \right) \end{aligned}$$

因而

$$i = \sqrt{2} \times 17.32 \sin(\omega t + 30^\circ) [\text{A}]$$

该结果与用瞬时表达式求出的式(1)及用波形求出的数值一致。

### 4.5.5 复数表示

(a) 复数 若仅用矢量对交流电路进行计算,经常会有用几



何方法很难求解的情况。因此如果能用数学式来表示矢量,则能够简单而且正确地求解。

下面来看这样的方程,在实数中不存在满足下式的 $x$ 值:

$$x^2 = -1$$

但是若考虑一个平方之后为 $-1$ 的量,并用 $j$ 表示该量;则用来处理矢量是非常有用的,该量称为虚数单位,用下式表示:

$$j^2 = -1 (j = \sqrt{-1})$$

$j$ 与实数有本质不同,因此必须加以区别。但与实数一起进行计算时,可采用下述形式的数进行,该数称为复数。

$$a + jb$$

式中, $a$ 为实数, $jb$ 为虚数。

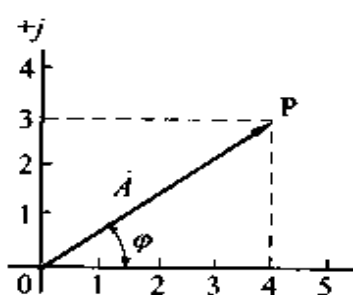


图 4.39

(b) 坐标系中的矢量 如图 4.39 所示,

将矢量  $\dot{A}^{(1)}$  放在坐标轴的原点  $O$  处,这时要知道矢量的状态,只要知道  $P$  的位置即可。另外,根据与基准轴之间的夹角  $\varphi$  也能够知道矢量的状态,但根据  $X$  轴上的 4 及  $Y$  轴上的 3 的交点来确定  $P$  点就更容易明白。

因此,若使距离原点的长度 4 相应于实数,3 相应于虚数,则矢量  $\dot{A}$  可以用下面的复数表示:

$$\dot{A} = 4 + j3$$

矢量的模  $A$  与辐角  $\varphi$  可以根据图 4.39 求出,结果如下:

$$\left. \begin{aligned} A &= \sqrt{4^2 + 3^2} = \sqrt{25} = 5 \\ \varphi &= \tan^{-1} \frac{3}{4} = \tan^{-1} 0.75 = 36.9^\circ \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(c) 复数之和 试求下面两个复数之和:

$$\begin{cases} \dot{A}_1 = 4 + j3 \\ \dot{A}_2 = 2 + j5 \end{cases}$$

1) 按照日本的表达方式, $\dot{A}$  上面附加一点,表示矢量。中国用黑体字表示矢量。

$$\begin{aligned}\dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{A}_2 = (4 + j3) + (2 + j5) \\ &= 6 + j8\end{aligned}$$

$$A = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{8}{6} = \tan^{-1} 1.33 = 53.1^\circ$$

如图 4.40 所示, 矢量和可以利用上式的复数计算简单求出:

(d) 复数的乘除

复数之积

$$\begin{aligned}\dot{A}_3 &= (4 + j3)(5 - j2) \\ &= 20 - j8 + j15 + 6 \\ &= 26 + j7\end{aligned}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{模} \quad A_3 = \sqrt{26^2 + 7^2} = 26.9 \\ \text{辐角} \quad \varphi_3 = \tan^{-1} \frac{7}{26} = 15.1^\circ \end{array} \right\}$$

(参见图 4.41)

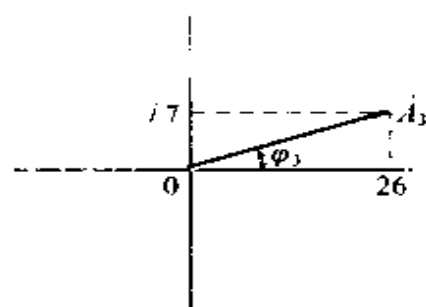


图 4.41

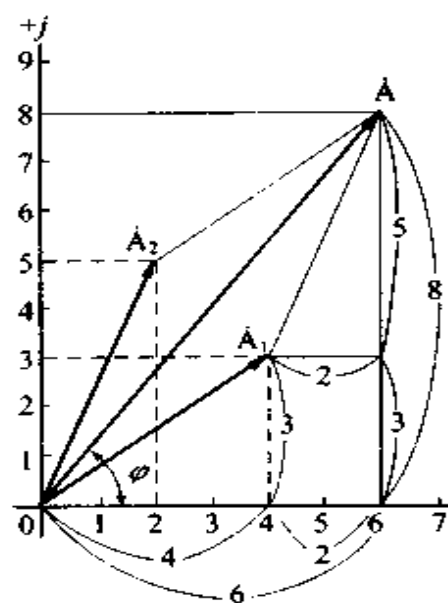


图 4.40

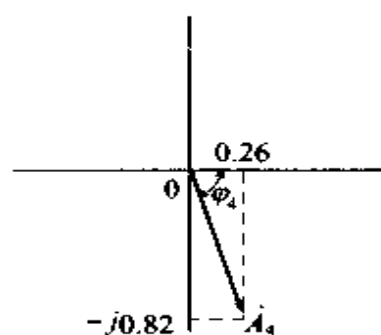


图 4.42

## 复数之商

$$\begin{aligned}\dot{A}_4 &= \frac{7-j5}{8+j6} = \frac{(7-j5)(8-j6)}{(8+j6)(8-j6)} \\ &= \frac{56-j42-j40-30}{64+36} \\ &= \frac{26}{100} - j \frac{82}{100} = 0.26 - j0.82\end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}\text{模} \quad A_4 &= \frac{\sqrt{26^2 + 82^2}}{100} = \frac{\sqrt{7400}}{100} \\ &= \frac{86.2}{100} = 0.862 \\ \text{辐角} \quad \varphi_4 &= \tan^{-1} \frac{82}{26} = 72.4^\circ\end{aligned} \right\} \text{(参见图 4.42)}$$

$$\text{所示} \quad \varphi_4 = -72.4^\circ$$

(e) 矢量的极坐标表示 在式(2)中,若已知矢量的模及辐角,则也可以如下所述表示。该表示方法称为极坐标表示<sup>2)</sup>。

$$\left. \begin{aligned}\dot{A} &= 5 / 36.9^\circ \\ \text{或者} \\ \dot{A} &= 5 (\cos 36.9^\circ + j \sin 36.9^\circ)\end{aligned} \right\}$$

(f) 利用复数进行合成 下面利用复数求  $i_1 = \sqrt{2} \times 10 \sin \omega t$  与  $i_2 = \sqrt{2} \times 10 \sin(\omega t + \pi/3)$  的合成电流。

用矢量表示  $i_1$  及  $i_2$  的有效值,则如图 4.43 所示。

$$\begin{aligned}7\dot{I} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \\ &= (10 + j0) + (5 + j5\sqrt{3})\end{aligned}$$

1) 为了使分母为实数,将分子分母乘以分母的共轭复数(虚数部分符号相反的复数)

2) 在电路中为了求出电压或电流等,经常进行乘法及除法。这时采用极坐标表示,可如下所示简单求出:

$$\text{当 } \dot{A}_1 = A_1 \angle \varphi_1, \dot{A}_2 = A_2 \angle \varphi_2$$

$$\text{当 } \dot{A}_1 \times \dot{A}_2 = A_1 A_2 \angle \varphi_1 + \varphi_2, \frac{\dot{A}_1}{\dot{A}_2} = \frac{A_1}{A_2} \angle \varphi_1 - \varphi_2。$$

$$I = \sqrt{15^2 + (5\sqrt{3})^2}$$

$$= \sqrt{300} = 17.32 \text{ A}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{5\sqrt{3}}{15}$$

$$= \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$= 30^\circ \text{ (或 } \frac{\pi}{6} \text{)}$$

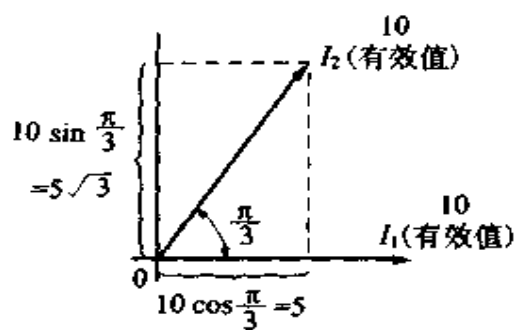


图 4.43

因而

$$i = \sqrt{2} \times 17.32 \sin(\omega t + 30^\circ) \quad [\text{A}]$$

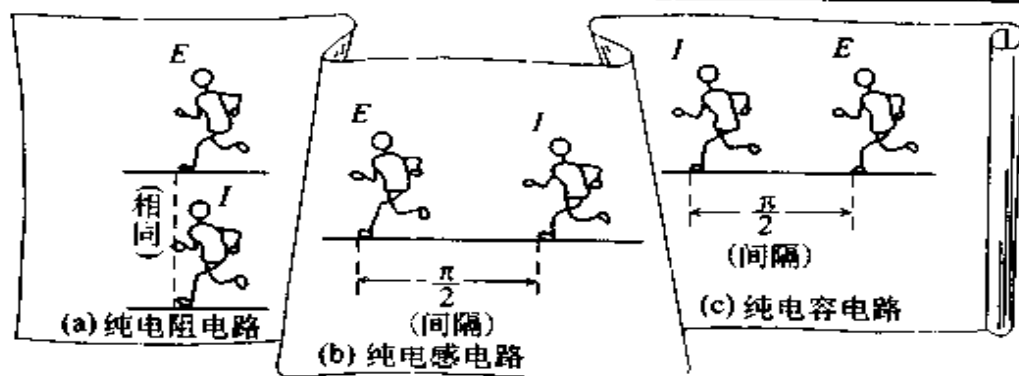
这与用瞬时表达式及矢量求得的结果相同。

# 4.6 阻碍交流电流的元素

## R, L, C 电路小结

表 4.6

	纯电阻电路	纯电感电路	纯电容电路
电 路 图			
电 源 电 压	$e = \sqrt{2} E \sin \omega t \text{ [V]}$		
阻 抗	$Z = R \text{ } [\Omega]$	$Z = X_L = 2\pi fL \text{ } [\Omega]$	$Z = X_C = \frac{1}{2\pi fC} \text{ } [\Omega]$
电流计算式	$I = \frac{E}{Z} = \frac{E}{R} \text{ [A]}$	$I = \frac{E}{Z} = \frac{E}{X_L} = \frac{E}{2\pi fL} \text{ [A]}$	$I = \frac{E}{Z} = \frac{E}{X_C} = 2\pi fCE \text{ [A]}$
电压与电流的 波 形 (电压为基准)			
电压与电流的 矢 量 图 (电压为基准)			
相位 (电压为基准)	同 相	电 流 滞 后	电 流 超 前

图 4.44 RLC 电路中的  $E$  与  $I$

### 4.6.1 电阻与阻抗

直流电路中阻碍电流的元件是电阻,而在交流电路中,起到阻碍电流作用的除了电阻以外,还有电感与电容。

图 4.45 所示即为这种情况。

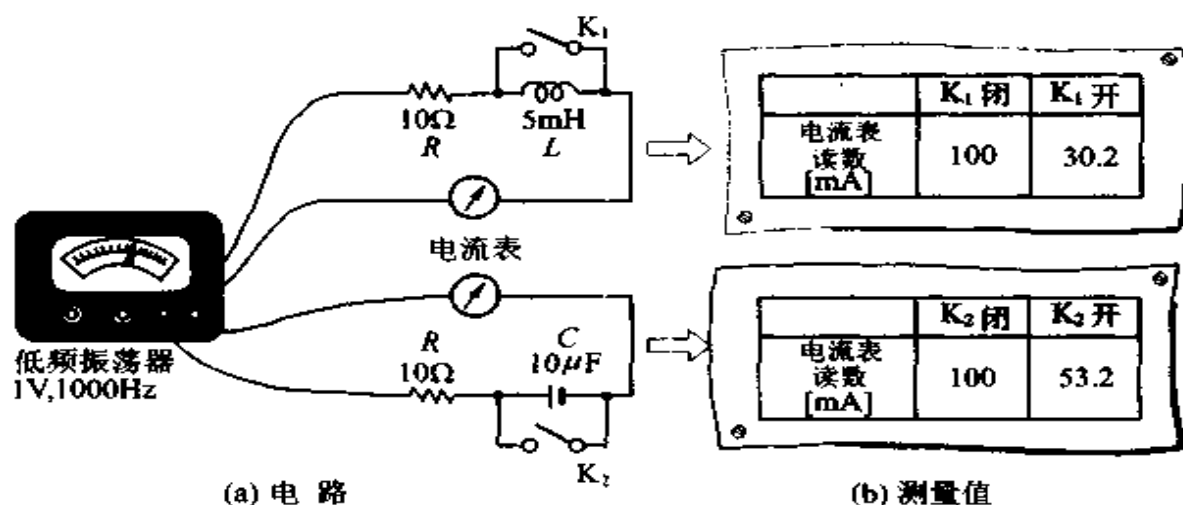


图 4.45 阻碍电流的  $R$ 、 $L$ 、 $C$

将测量的电流加以比较,若将  $K_1$  及  $K_2$  闭合,即仅有电阻时,所示电流均为 100mA。但是,若将  $K_1$  及  $K_2$  断开,即接入电感  $L$  及电容  $C$ ,则电流减少为 30.2mA 及 53.2mA。由此可知,电感  $L$  及电容  $C$  也起到阻碍交流电流的作用。

这样,将阻碍交流电流的元件总称为阻抗,用符号  $Z$  表示,单位为欧姆  $[\Omega]$ 。

$$I = \frac{E}{Z} \quad [A]$$

$Z$  为阻抗,是电阻  $R$ 、电感  $L$  及电容  $C$  的总称。

下面研究交流电路基本组成的  $R$ 、 $L$ 、 $C$  对交流具有怎样的作用。

### 4.6.2 纯电阻电路

若对纯电阻电路加上  $e = E_m \sin \omega t$  [V] 的电压,则流过的电流

如下所示:

$$i = \frac{e}{R} = \frac{E_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t$$

式中,  $I = E/R$ 。

因而,电阻电路的电压与电流的关系与直流的情况完全相同。

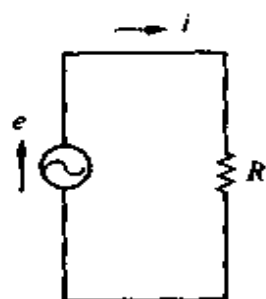
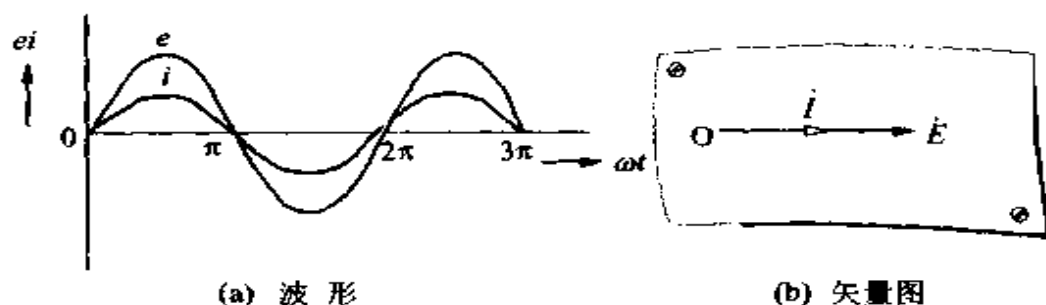


图 4.46 电阻电路

**大小关系**  $I = \frac{E}{R}$  ( $I$ 、 $E$  用有效值表示)

**相位关系** 电压与电流同相



(a) 波形

(b) 矢量图

图 4.47 电阻电路的波形与矢量关系

### 4.6.3 纯电感电路

在图 4.48 的电感电路中,若因电压作用而产生电流,则根据第 2 章已学习过的内容,由于自感的作用,在  $L$  中产生感应电动势  $e_L$ 。

$$e_L = -e = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad [\text{V}]$$

该  $e_L$  具有与电源电压  $e$  相反的极性,换句话说,具有能满足  $e_L = -e$  的电流  $i$  流过。但是,由于电源电压  $e$  随时间而变化,因此  $i$  也随时间而变化,它们的关系如下所述(图 4.49)。

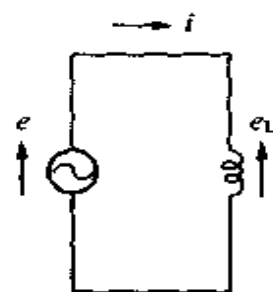


图 4.48 电感电路

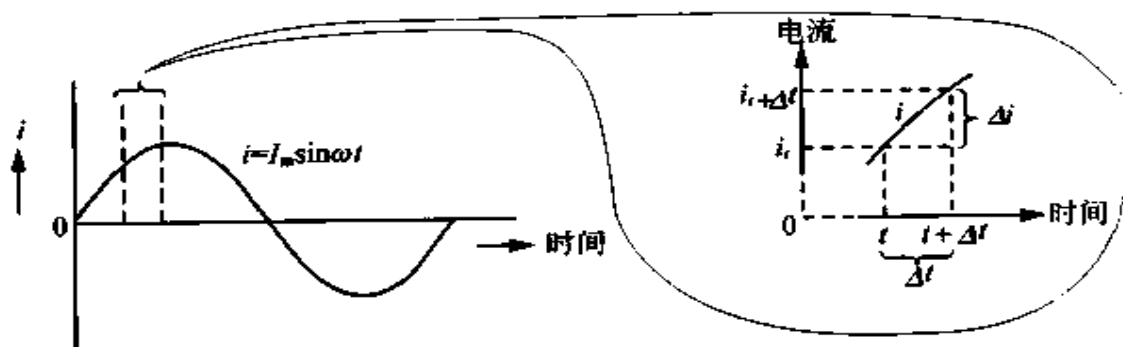


图 4.49 电感电路的电流变化

流过自感  $L$  [H] 的电流若在  $\Delta t$  秒钟变化  $\Delta i$ , 则表示如下:

$$\begin{aligned} i_t + \Delta i &= I_m \sin \omega(t + \Delta t) \\ &= I_m (\sin \omega t \cos \omega \Delta t^{1)} + \cos \omega t \sin \omega \Delta t^{2)}) \\ &= I_m \sin \omega t + I_m \omega \Delta t \cos \omega t \end{aligned}$$

由于电源电压  $e$  用  $L(\Delta i / \Delta t)$  表示, 因此

$$\begin{aligned} e &= L \frac{i_t + \Delta i - i_t}{\Delta t} \\ &= L \frac{(I_m \sin \omega t + I_m \omega \Delta t \cos \omega t) - I_m \sin \omega t}{\Delta t} \\ &= L \frac{I_m \omega \Delta t \cos \omega t}{\Delta t} = \omega L I_m \cos \omega t = E_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \\ &= \sqrt{2} E \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{aligned}$$

式中,  $E = \omega L I$ 。

上式是以电流为基准, 若用有效值表示电感电路的电压与电流的关系, 则如下所示:

大小关系	$I = \frac{E}{\omega L} = \frac{E}{2\pi f L} [\text{A}]$
------	--

- 1) 若  $\Delta t$  非常小, 则  $\cos \omega \Delta t \approx 1$ 。  
 2) 若  $\Delta t$  非常小, 则  $\sin \omega \Delta t \approx \omega \Delta t$ 。



相位关系 电流滞后于电压  $\pi/2$

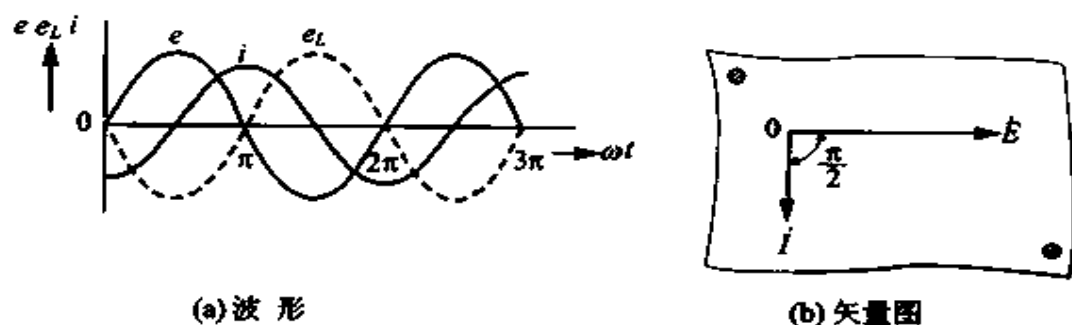


图 4.50 电感电路的波形与矢量关系

#### 4.6.4 纯电容电路

在图 4.51 的电容电路中,由于电压  $e$  的作用,在电容器  $C$  中储存有电荷  $q$ 。

$$\begin{aligned} q &= C \times e \\ &= CE_m \sin \omega t \quad [C] \end{aligned}$$

由于该电荷  $q$  与电压成正比,因此随时间而变化,而流过电路的电流  $i$  以  $\Delta q / \Delta t$  的变化率表示。

向电容器  $C[F]$  移动的电荷,若在  $\Delta t$  秒钟变化  $\Delta q$ ,则电流  $i$  如下所示(图 4.52):

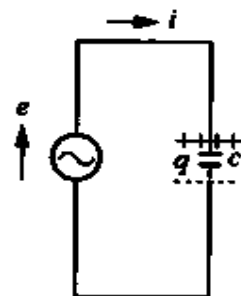


图 4.51 电容电路

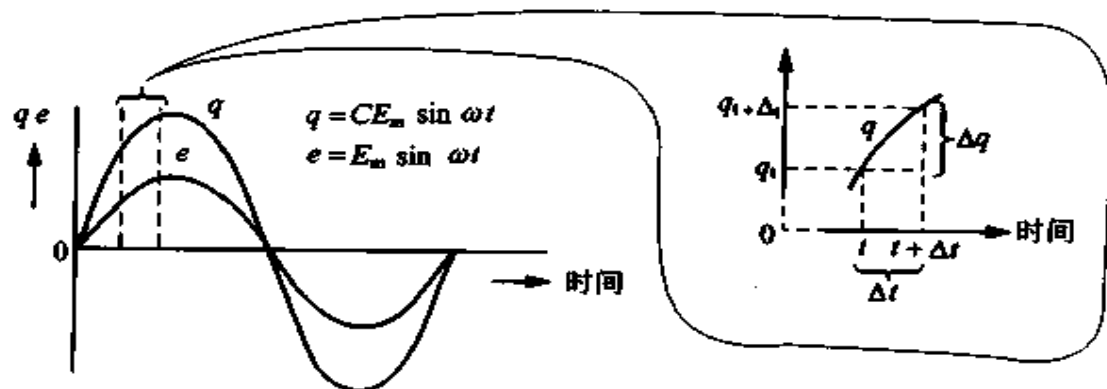


图 4.52 电容电路的电荷变化

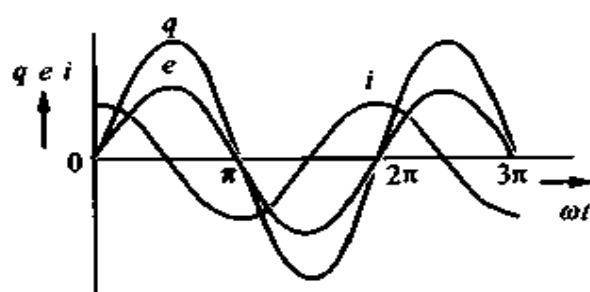
$$\begin{aligned}
 i &= \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{q_{t+\Delta t} - q_t}{\Delta t} \\
 &= \frac{CE_m \sin \omega(t + \Delta t) - CE_m \sin \omega t}{\Delta t} \\
 &= CE_m \frac{(\sin \omega t \cos \omega \Delta t + \cos \omega t \sin \omega \Delta t) - \sin \omega t}{\Delta t} \\
 &= CE_m \omega \cos \omega t = \omega CE_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \\
 &= I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})
 \end{aligned}$$

式中,  $I = \omega CE$ 。

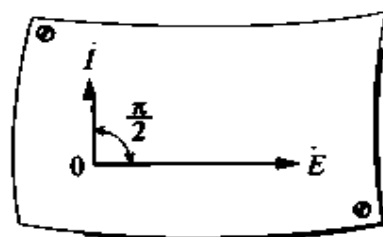
上式是以电压为基准,若用有效值表示电容电路的电压与电流的关系,则如下所示:

大小关系  $I = \omega CE = \frac{E}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{E}{\frac{1}{2\pi f C}} [\text{A}]$

相位关系 电流超前于电压  $\pi/2$ 。



(a) 波形



(b) 矢量图

图 4.53 电容电路的波形与矢量关系

**例 4.5** 当 20mH 电感量的线圈加上 50Hz、10V 的交流电压时,求流过线圈的电流。

解答:

$$\begin{aligned} I &= \frac{E}{\omega L} = \frac{E}{2\pi fL} = \frac{10}{2 \times \pi \times 50 \times 20 \times 10^{-3}} \\ &= \frac{10}{6.28 \times 10^3 \times 10^{-3}} = \frac{10}{6.28} = 1.59 \text{ A} \end{aligned}$$

——→ 电流为 1.59 A

**例 题** 当  $20\mu\text{F}$  电容量的电容器加上  $50\text{Hz}$ 、 $10\text{V}$  的交流电压时,求流过电容器的电流。

解答

$$I = \omega CE = 2\pi fCE = 2 \times \pi \times 50 \times 20 \times 10^{-6} \times 10 = 62.8 \times 10^{-3} \text{ A}$$

——→ 电流为 62.8 mA

## 4.7 频率与电抗的关系

### 电抗与频率

电抗在交流电路中也起到阻碍电流的作用,其大小随频率  $f$  而变化。电抗有感抗  $X_L$  及容抗  $X_C$  两种。

### 电抗的公式

$$\text{感抗 } X_L = \omega L = 2\pi fL [\Omega]$$

$$\text{容抗 } X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} [\Omega]$$

### 电抗与相位

$X_L$  与  $X_C$  的相位关系正好相反。因而,两者有  $180^\circ$  的相位差。

交流电路中许多英文术语的接尾都是 tance, 参见表 4.7。

表 4.7

术语	英语	符号	单位
电阻	resistance	$R$	$\Omega$
电感	inductance	$L$	H
电容	capacitance	$C$	F
阻抗	impedance	$Z$	$\Omega$
电抗	reactance	$X$	$\Omega$
感抗	inductive reactance	$X_L$	$\Omega$
容抗	capacitive reactance	$X_C$	$\Omega$

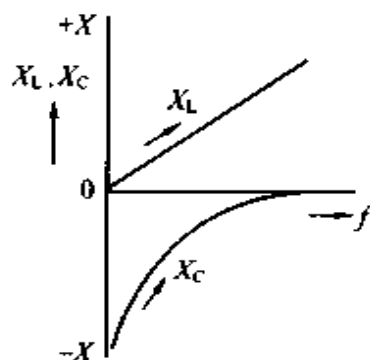


图 4.54

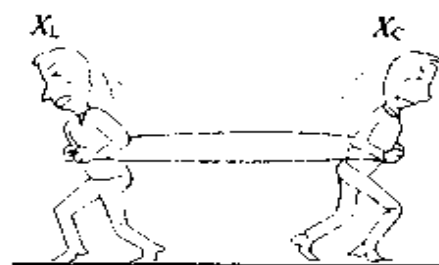


图 4.55  $X_L$  与  $X_C$  的  
相位关系



图 4.56 ...tance 的含义

### 4.7.1 感抗与频率

若加上的电压为  $E$ , 则流过电感的电流  $I$  如 4.6.3 小节所示, 有下述的关系:

$$I = \frac{E}{\omega L} = \frac{E}{2\pi f L} \quad [\text{A}]$$

该式中的分母  $2\pi f L$  起到阻碍电流的作用。这是交流中的电抗, 称为感抗, 用符号  $X_L$  表示。其单位与电阻相同, 用欧姆  $[\Omega]$ 。

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad [\Omega]$$

若电感量  $L$   $[\text{H}]$  一定, 则感抗  $X_L$  将与电源频率成正比。

下面用表 4.8 及图 4.57 表示这一关系。

表 4.8  $X_L$  与频率的关系举例  
( $L = 50\text{mH}$ )

频率 $f$ [Hz]	0	10	100	1000	10 000	100 000
感抗值 $X_L$ $[\Omega]$	0	3.14	31.4	314	3 140	31 400

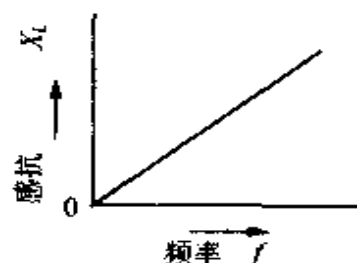


图 4.57  $X_L$  的频率特性

由上述可知, 感抗  $X_L$  具有与频率成正比增大的性质。在收音机或电视机等具有较高频率的电路中, 即使电感量  $L$  的数值较小,  $X_L$  仍起着较大的阻碍作用。

反之, 低频电路的  $X_L$  较小, 特别是当频率为零 (看成直流) 时, 由表 4.8 可知,  $X_L$  为零。

感抗  $X_L$  的频率特性具有的性质是, 对于直流的感抗为零, 对于交流的感抗与频率成正比, 这种频率特性可灵活应用于许多场合。

### 4.7.2 电气铁道的阻抗板

直流分量通过而交流分量不易通过的性质可用于电气铁道信号控制电路的阻抗板。

图 4.58 为设置信号机地点的电气铁道线路, 在两条线路间

可以看到有阻抗板。

该阻抗板是在铁心上绕有线圈而制成,其作用是使直流分量通过,而使信号机动作的交流分量不通过。

这里,所谓直流分量如图 4.59 所示,是指使电车运动的动力源的直流。通过架空线与受电弓得到的直流使电动机旋转后,通过轨道作为回线又返回至变电站,这样作为一个整体,构成一个大的电路。



图 4.58 信号机与阻抗板

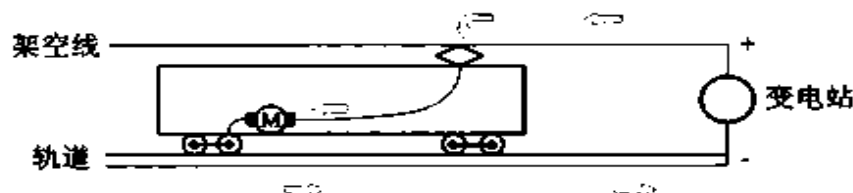


图 4.59 电车与回流(直流)的流动

另外,如图 4.60 所示,为了使信号机动作,将轨道每隔一定长度形成电气绝缘的闭塞区间,如图中的 A、B、C。在闭塞区间中加上信号动作的交流电压<sup>1)</sup>,信号控制用的继电器利用该电压而动作。一旦电车进入该闭塞区间,则利用车轮使轨道间短路,电压就不加在信号控制用的继电器上,因此检测该变化,控制电路就发出红色信号。因而,闭塞区间形成对信号进行控制的独立交流电路,而相邻闭塞区间之间是电气绝缘的。这样一来使回流(直流)就不能流动,因此用阻抗板连接闭塞区间,通过这样的办法使直流通过,而交流(信号电流)在相邻区间不能通过。

阻抗板放在设置信号机附近的线路上,因此在电车站台及道口处可以见到。

1) 是工频交流电压,约 10V。

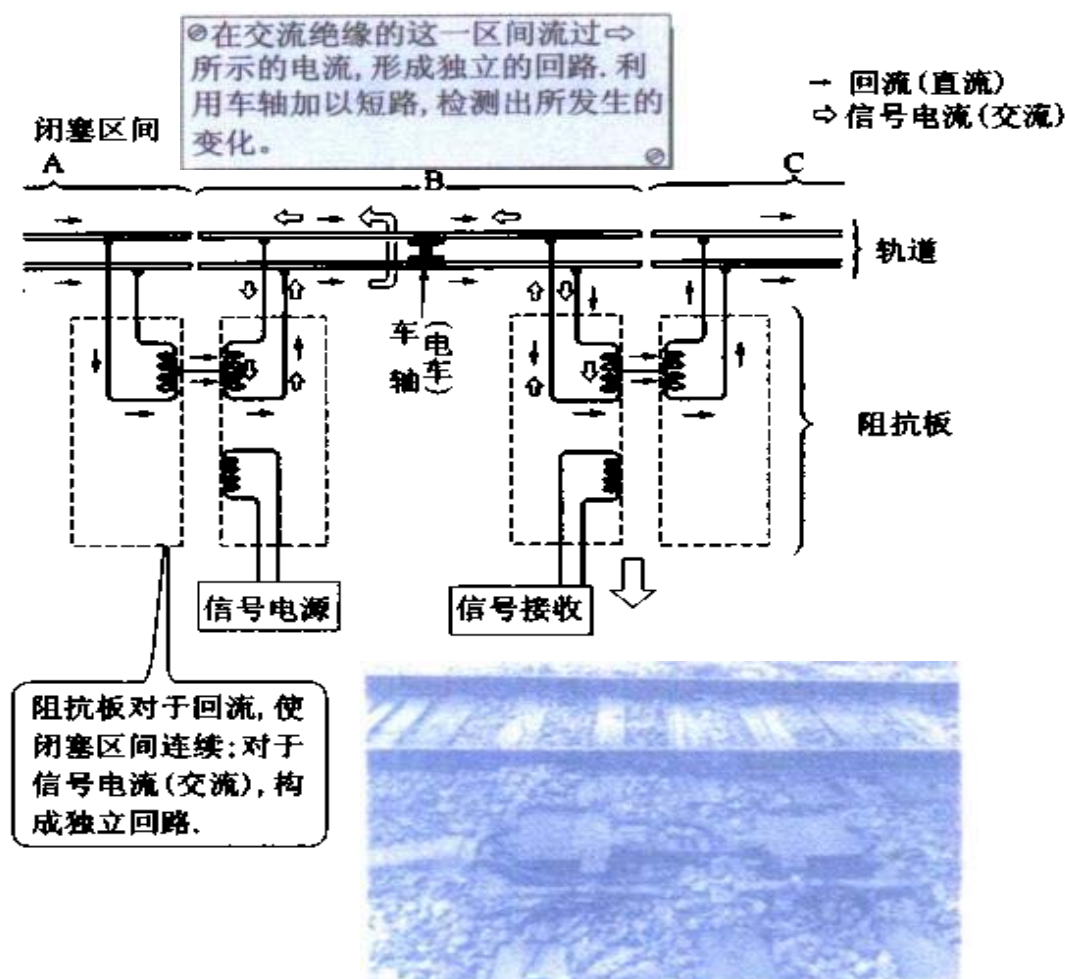


图 4.60 闭塞区间及阻抗板

## 4.7.3 容抗与频率

若加上的电压为  $E$ , 则流过电容器的电流  $I$  如 4.6.4 小节所示, 有下述的关系:

$$I = \frac{E}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{E}{\frac{1}{2\pi f C}} \quad [\text{A}]$$

该式中的分母  $1/(2\pi f C)$  起到阻碍电流的作用。这也是交流中的电抗, 称为容抗, 用符号  $X_c$  表示。其单位与电阻相同, 用欧姆  $[\Omega]$  表示。

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad [\Omega]$$

若电容器的电容量  $C[F]$  一定, 则容抗  $X_c$  将与电源频率成反比。下面用表 4.9 及图 4.61 表示这一关系。

表 4.9  $X_c$  与频率的关系举例

( $C = 1\mu F$ )

频率 $f [Hz]$	0	10	100	1 000	10 000	100 000
容抗值 $X_c [\Omega]$	$\infty$	15 920	1 592	159.2	15.92	1.592

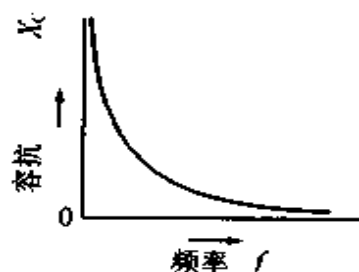


图 4.61  $X_c$  的频率特性

由上可知, 容抗  $X_c$  的值与频率成反比变化。在收音机或电视机等具有较高频率的电路中, 相对交流的电抗较小。

反之, 低频电路的  $X_c$  较大, 特别是对于频率为零 (看成直流) 的电源, 由表 4.9 可知, 容抗为无穷大。

容抗  $X_c$  的频率特性具有的性质是, 对于直流的容抗为无穷大, 而频率越高, 容抗值越小, 这种频率特性可灵活应用于许多场合。

#### 4.7.4 收音机电路的旁路电容器

频率越高的交流越容易通过而直流不能通过的性质可用于收音机的放大电路。

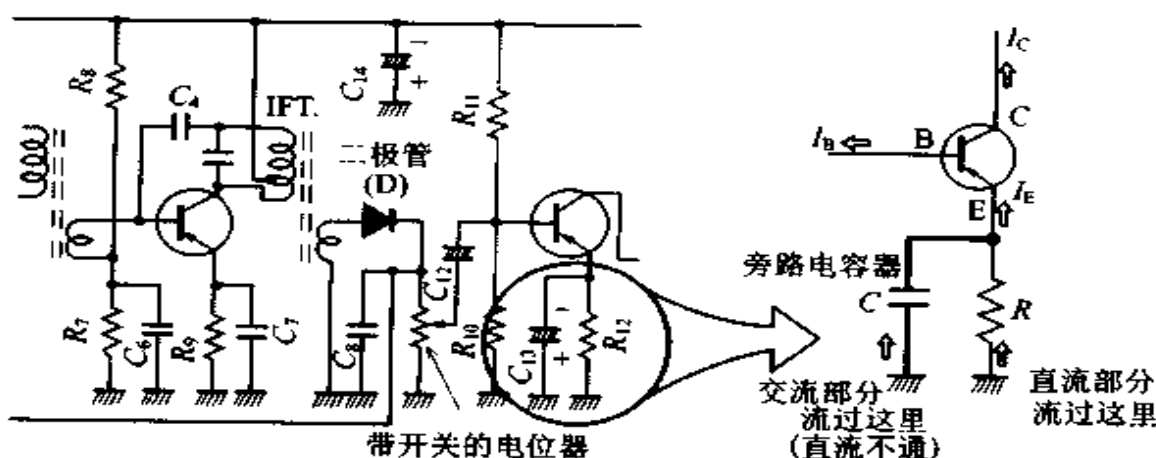


图 4.62 收音机电路与旁路电容器



图 4.62 中粗线所示的电容器  $C$  称为旁路电容器。根据电容器具有的频率特性,将  $C$  与  $R$  并联,使交流分量通过该电容器  $C$ ,使直流分量通过电阻  $R$ 。

这样一来的作用是,发射极( $E$ )的电位,对于交流为零,对于直流为电阻  $R$  的电压降所产生的电位差。

从放大器的正常工作来说,在基极  $B$  与发射极之间必须加上一个直流电压(称为偏置电压),这由电路中的电阻  $R$  产生的电压降提供。

#### 4.7.5 电抗与相位

感抗  $X_L$  与容抗  $X_C$  的值随频率而改变,另外如纯电感  $L$  及纯电容  $C$  的电路所示,其相位还不一样。

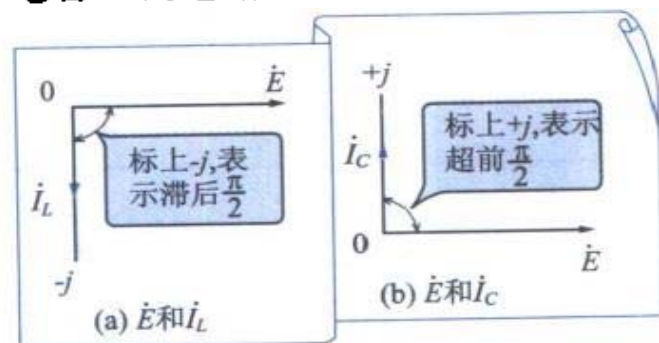


图 4.63 电抗电路的相位

在图 4.63 中,若以电压  $\dot{E}$  为基准,则  $\dot{I}_L$  与  $\dot{I}_C$  分别具有  $\pi/2$  的相位差,因此正好相互相差  $180^\circ$ 。用复数来表示包含相位关系的表达式比较方便,这种方法称为符号法,即可以利用  $j$  的符号来表示相位关系。

若利用该符号法来表示  $\dot{I}_L$  及  $\dot{I}_C$ ,则如下所示:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_L &= \frac{\dot{E}}{jX_L} = \frac{\dot{E} \times j}{jX_L \times j} = -j \frac{\dot{E}}{X_L} [\text{A}] \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{E}}{-jX_C} = \frac{\dot{E}(j)}{-jX_C(j)} = j \frac{\dot{E}}{X_C} [\text{A}] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

这样一来,因为用  $-j$  表示滞后  $\pi/2$ ,用  $+j$  表示超前  $\pi/2$ ,所以计算非常方便。

另外,若  $X_L$  及  $X_C$  用下面的形式表示,则也包含了相位关系:

$$\begin{aligned} \text{感抗} \quad X_L &= j\omega L = j2\pi fL [\Omega] \\ \text{容抗} \quad X_C &= -j \frac{1}{\omega C} = -j \frac{1}{2\pi fC} [\Omega] \end{aligned}$$

# 4.8 交流电路的基本计算

表 4.10 串联电路及并联电路的小结

电路构成	电 路 图	阻抗 $[\Omega]$	电压与电流的关系	电压与电流的 相位差 $[\text{rad}]$
RL 串联		$Z = R + j\omega L$ $Z = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}$		$\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$
RC 串联		$Z = R - j \frac{1}{\omega C}$ $Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2}$		$\varphi = \tan^{-1} \frac{1/(\omega C)}{R}$ $= \tan^{-1} \frac{1}{R\omega C}$
RLC 串联		$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$ $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$		$\varphi = \tan^{-1} \frac{X}{R}$ X 为 $\omega L$ 与 $1/(\omega C)$ 之差
RL 并联		$\dot{Z} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}}$ $I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$		$\varphi = \tan^{-1} \frac{I_L}{I_R}$
RC 并联		$\dot{Z} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}}$ $I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$		$\varphi = \tan^{-1} \frac{I_C}{I_R}$
RLC 并联		$\dot{Z} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}}$ $I = \sqrt{I_R^2 + (I_L + I_C)^2}$ $= \sqrt{I_R^2 + I_X^2}$		$\varphi = \tan^{-1} \frac{I'}{I_R}$ I' 为 $I_L$ 与 $I_C$ 之差

## 4.8.1 RLC 串联电路

前面的电路仅仅是纯电阻  $R$ 、纯电感  $L$  或纯电容  $C$  的电路,但一般电路常常是它们的组合。即使这种情况下,当然还是以纯电阻、纯电感及纯电容电路的基本性质为基础的。

## (a) 串联电路的矢量图

RLC 串联的情况下,即使说矢量图会画,可一开始总稍微有点感到困难。但是,如果按照图 4.64 那样加以分解,就能够掌握方法了。

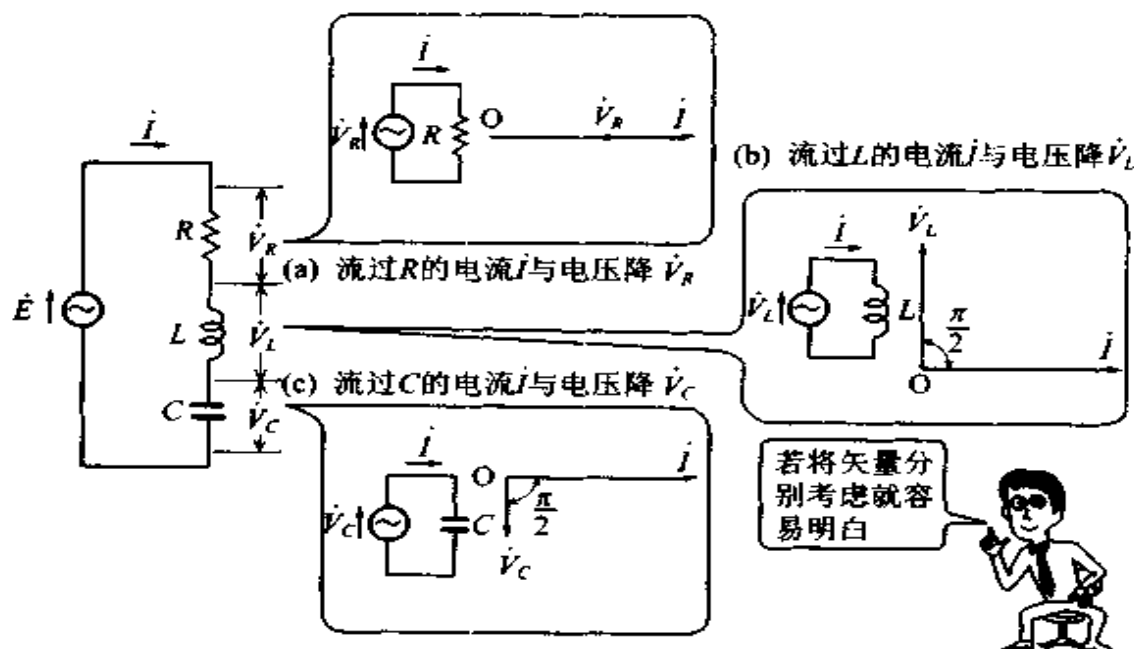


图 4.64 串联电路及矢量的考虑方法

在考虑矢量时,必须确定一个基准。在串联电路中,对于电路各组成部分的  $\dot{E}$ 、 $R$ 、 $L$ 、 $C$  来说,电流  $\dot{i}$  都相同,具有共同性,因此以它作为基准。然后,就相对于  $\dot{i}$  画出各电压降  $\dot{V}_R$ 、 $\dot{V}_L$ 、 $\dot{V}_C$ 。这时,如图 4.64(a)、(b)、(c) 所示,  $\dot{V}_R$ 、 $\dot{V}_L$ 、 $\dot{V}_C$  作为单独电源<sup>1)</sup>来

1) 实际上是  $R$ 、 $L$ 、 $C$  的电压降,但由于分别考虑,因此作为电源  $\dot{V}_R$ 、 $\dot{V}_L$ 、 $\dot{V}_C$  来处理。

考虑,把它考虑为分别加在  $R$ 、 $L$ 、 $C$  上的电压矢量。

这样一来,与 4.6 节学习的纯电阻、纯电感及纯电容时的矢量(表 4.6)相同,就能很简单地表示电流及电压的关系。

而实际上在  $RLC$  串联电路中,电流  $i$  对  $R$ 、 $L$ 、 $C$  是相同的,因此若将该电流  $i$  重叠起来,画出  $\dot{V}_R$ 、 $\dot{V}_L$ 、 $\dot{V}_C$ ,就得到图 4.65 的矢量图。

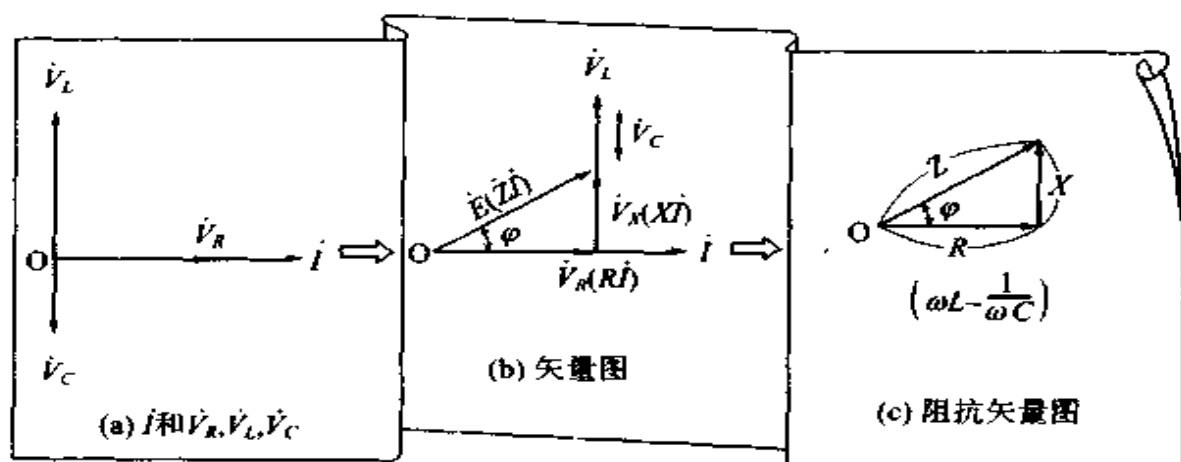


图 4.65  $RLC$  串联电路的矢量图

按照图 4.64(a)、(b)、(c)的样子重新画在一起,即得到图 4.65(a)。图 4.65(b)所示为这些矢量进行矢量相加的结果,这就是  $RLC$  串联电路的矢量图。

• **阻抗矢量** 图 4.65(c)所示不是电压与电流有关的矢量,是去掉了图(b)的公共电流,方便起见称为**阻抗矢量**。由于  $R$ 、 $X$ 、 $Z$  是只有大小、没有方向的量,因此要将它们与前面的矢量加以区别来考虑。从图中可以很清楚看出  $R$ 、 $X$ 、 $Z$  三者的关系,相位  $\varphi$  等也可以从图中求出,因此十分方便。

#### (b) 利用符号法计算 $RLC$ 串联电路

若用符号法表示  $R$ 、 $L$ 、 $C$ ,则如前所述表示如下:

电阻	$R$
电感	$j\omega L = jX_L$
电容	$-j\frac{1}{\omega C} = -jX_C$

在  $RLC$  串联电路中

$$\begin{aligned}\dot{E} &= \dot{V}_R + \dot{V}_L + \dot{V}_C = R\dot{I} + j\omega L\dot{I} - j\frac{1}{\omega C}\dot{I} \\ &= \left(R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}\right)\dot{I} \\ \dot{I} &= \frac{\dot{E}}{R + j[\omega L - 1/(\omega C)]} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}} \quad [\text{A}]\end{aligned}$$

所以

$$\dot{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad [\Omega]$$

由上可知,阻抗一般可表示为

$$\dot{Z} = R + jX \quad [\Omega]$$

实部称为电阻,虚部称为电抗,采用的单位相同,为欧姆( $\Omega$ )。

该阻抗  $Z$  及电流  $I$  的大小和电流电压的相位差  $\varphi$  可利用下式求出:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad [\Omega]$$

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2}} \quad [\text{A}]$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L - 1/(\omega C)}{R}$$

(c) 电压与电流的相位关系  $RLC$  串联电路的相位关系取决于  $\omega L$  与  $1/(\omega C)$  的大小,如图 4.66 所示而变化。

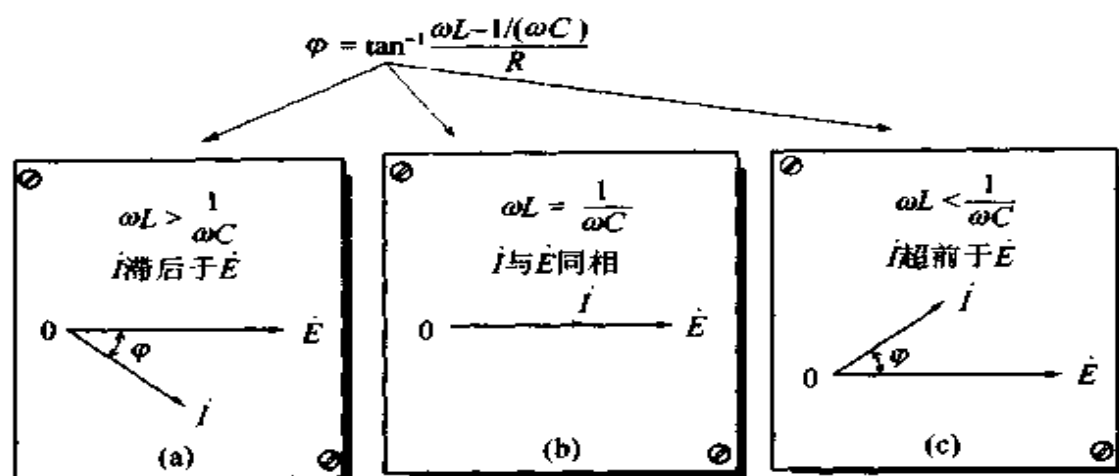


图 4.66 RLC 串联电路的相位关系

## 4.8.2 RLC 并联电路

(a) 并联电路的矢量图 由电路图可知,对于并联电路各组成部分的  $R$ 、 $L$ 、 $C$  来说,电压  $\dot{E}$  都相同,具有共同性,因此以它作为基准。

由于是并联,该电压加在  $R$ 、 $L$ 、 $C$  两端,因此可以如图 4.67 所示加以分解来考虑。

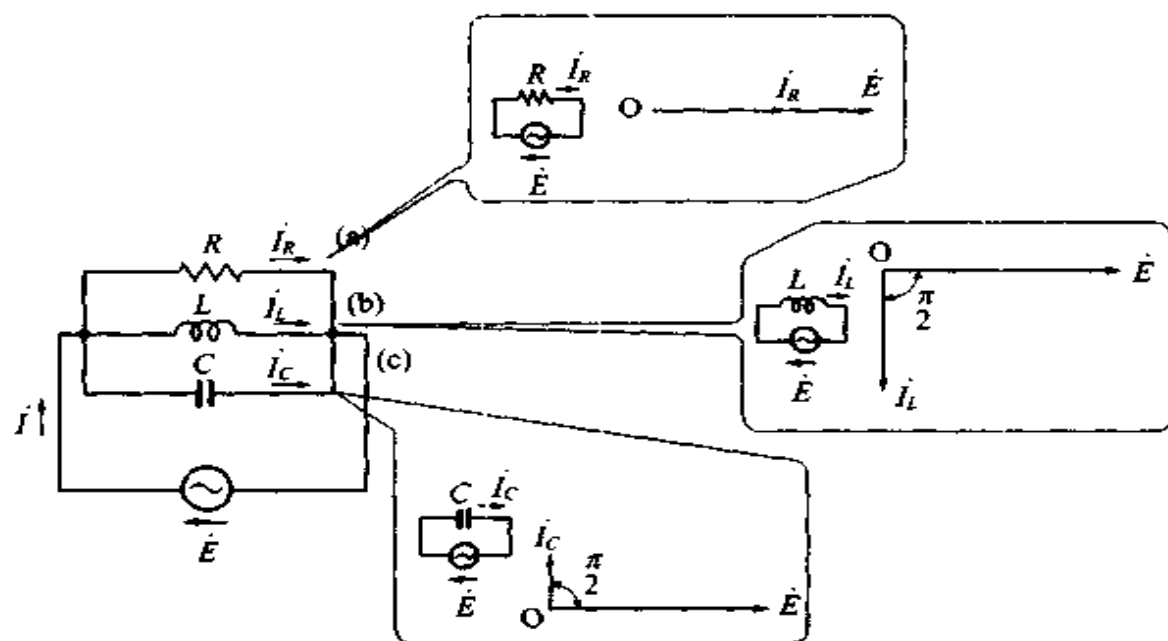


图 4.67 并联电路矢量的考虑方法

对于分解的部分,与4.6节学习的纯电阻、纯电感及纯电容电路的电压与电流相同。因此若将公共电压 $\dot{E}$ 重叠起来,将 $\dot{I}_R$ 、 $\dot{I}_L$ 、 $\dot{I}_C$ 画在一起,则如图4.68(a)及(b)所示。

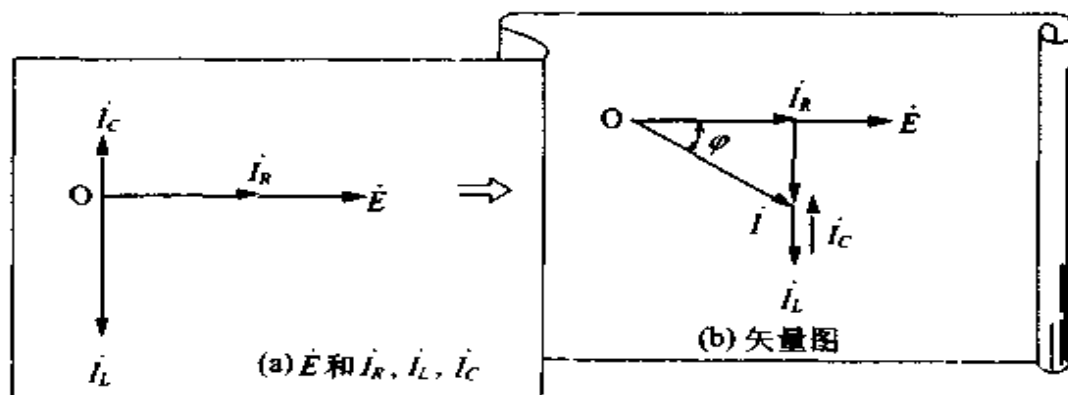


图 4.68 RLC 并联电路的矢量图

#### (b) 利用符号法计算 RLC 并联电路

$$\begin{aligned}\dot{I} &= \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C = \frac{\dot{E}}{R} + \frac{\dot{E}}{j\omega L} + \frac{\dot{E}}{-j[1/(\omega C)]} \\ &= \dot{E} \left\{ \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{-j[1/(\omega C)]} \right\}\end{aligned}$$

这里,若用 $\dot{E}/\dot{I}$ 表示阻抗 $\dot{Z}$ ,则如下所示:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{-j[1/(\omega C)]}}$$

**并联等效阻抗等于各组成部分的倒数和的倒数**

#### 4.8.3 电气产品的基本组成要素

我们身边有许多电气产品,究其发挥作用的基本组成要素如图4.69所示。



图 4.69 家用电气产品的基本组成要素

这样,在电路常数  $R$ 、 $L$ 、 $C$  中,可以说大部分负载的基本组成要素是  $L$  及  $R$ ,即利用电热丝的产品其基本组成要素是电阻  $R$ ,而利用电动机的产品则为电感  $L$ ,而没看到电容  $C$ 。因此,一般流过供电系统的电流相位滞后于电压。

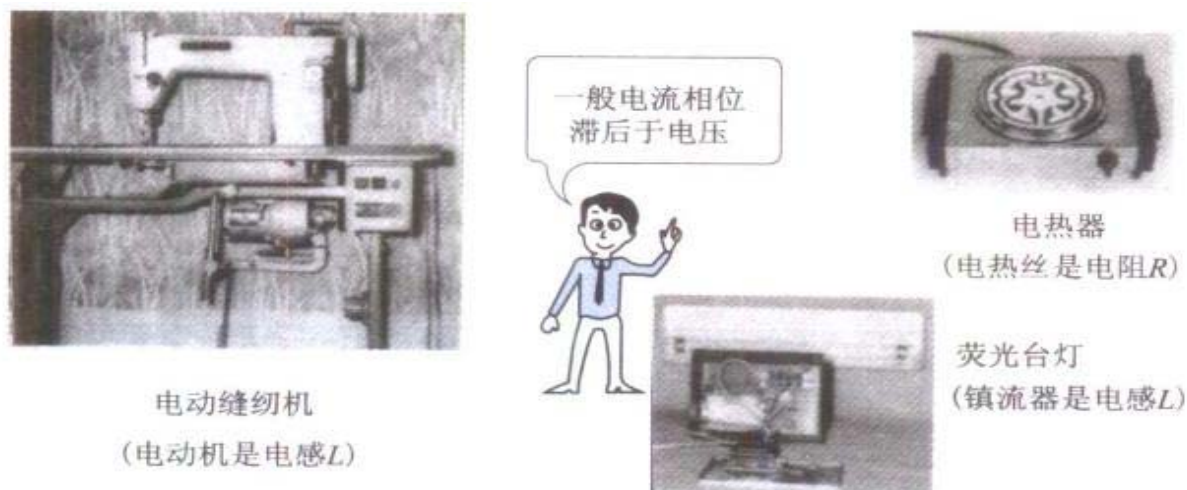


图 4.70 电气产品及其组成要素



## 4.9 电路的特殊现象



图 4.71 收音机与电视机的选台(东京)

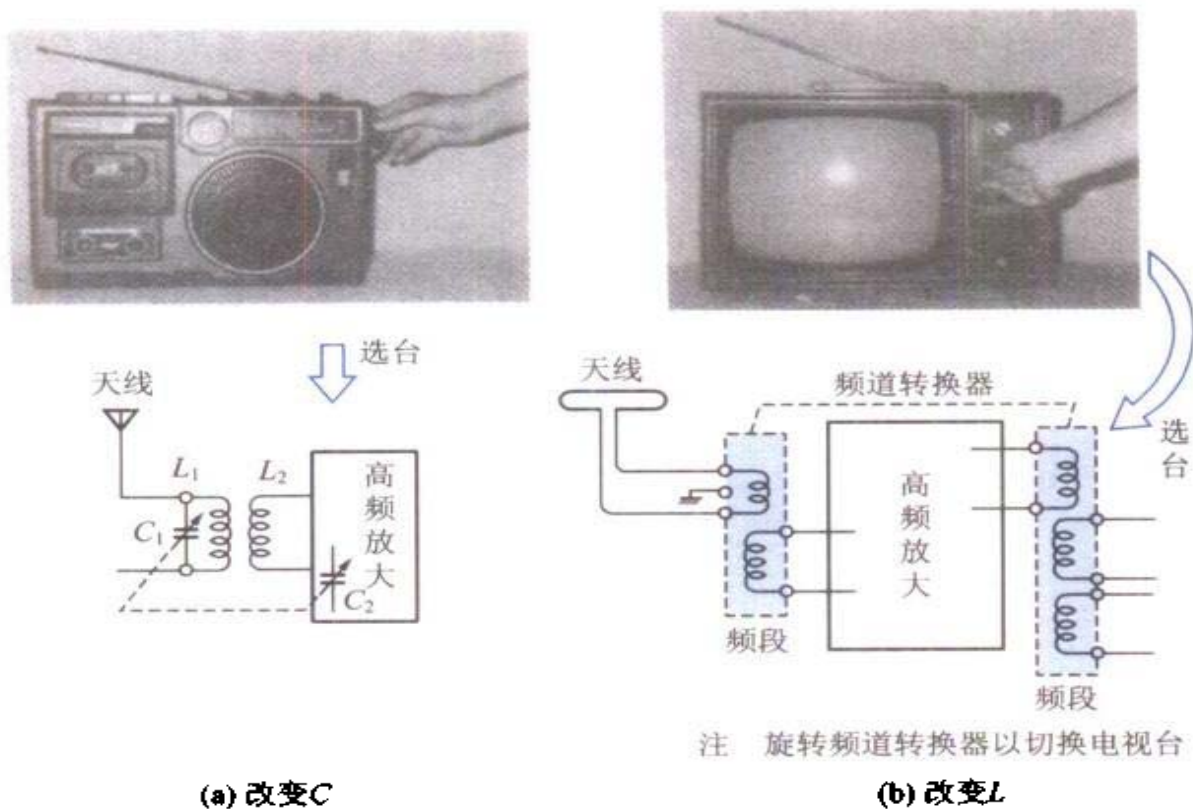
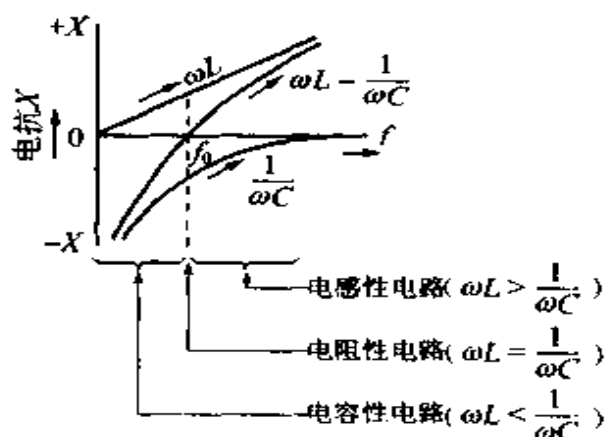


图 4.72 收音机与电视机选台举例

4.9.1  $\omega L = 1/(\omega C)$  的含义

前面已经知道,在  $RLC$  串联电路中,即使  $R$ 、 $L$ 、 $C$  的数值保持不变,但感抗  $X_L(\omega L)$  及容抗  $X_C(1/\omega C)$  的值将随频率而变。这时,不仅大小有关系,而且电压与电流的相位差也有关系。

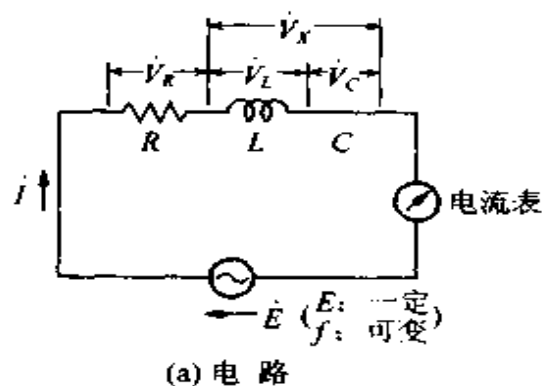
若用符号法表示感抗与容抗,则为

图 4.73  $RLC$  串联电路及频率

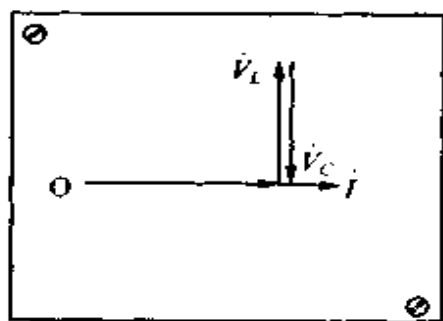
$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_L &= j\omega L = j2\pi fL \\ \dot{X}_C &= -j\frac{1}{\omega C} = -j\frac{1}{2\pi fC} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

因此,若频率从零逐渐向无穷大增加,则  $X_L$  与频率成正比增加,而  $X_C$  从无穷大逐渐向零减小下去。由于在相位关系上两者正好相反,因此电抗的变化要考虑到相位的关系,图 4.73 所示即为电抗与频率的关系。

关系,图 4.73 所示即为电抗与频率的关系。



(a) 电路



(b) 矢量图

图 4.74 串联谐振电路

由图 4.73 可知,当频率从零逐渐增加至无穷大时,其间必然有一个频率  $f_0$ ,使得  $\omega L = 1/(\omega C)$ 。这时的阻抗及电流如下所示:

$$|\dot{Z}| = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} = \sqrt{R^2 + (0)^2} = R[\Omega]$$

$$|\dot{I}| = \frac{E}{Z} = \frac{E}{R} \text{ (看起来为纯电阻) } [A]$$

即由于  $\omega L$  与  $1/(\omega C)$  相等, 因此从电源来看的阻抗变成纯电阻, 电压与电流变成同相。RLC 串联电路的这种状态称为串联谐振或电压谐振。

为了了解这种串联谐振现象, 可以通过实验, 将电源的频率从零慢慢地增加, 可以发现电路中串联的电流表慢慢增加, 直至达到最大值又慢慢减少, 在达到最大值时即为串联谐振。

#### 4.9.2 串联谐振频率

串联谐振在什么频率下产生? 这可以根据  $\omega L = 1/(\omega C)$  的条件按下述方法求出串联谐振频率  $f_0$ 。

• 串联谐振频率的求解 设  $\omega_0$  为谐振角频率,  $f_0$  为谐振频率, 则

$$\begin{aligned} \omega_0 L &= \frac{1}{\omega_0 C} \rightarrow \omega_0^2 LC = 1 \\ f_0^2 &= \frac{1}{(2\pi)^2 LC} \rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [Hz] \end{aligned}$$

$V_L$  及  $V_C$  比电源电压大, 有这样的怪事吗?



图 4.75

#### 4.9.3 电压增大作用

若 RLC 串联电路处于谐振状态下, 则有可能产生  $L$  及  $C$  的端电压大于电源电压的现象。串联谐振也可以说具有电压增大作用。

下面来计算图 4.74(a) 的电路中电压增大多少倍?

设  $I_0$  为谐振电流, 则:

$$I_0 = \frac{E}{R} \quad [A]$$

$L$  及  $C$  的端电压为

$$\left. \begin{aligned} V_L &= \omega_0 L I_0 = \omega_0 L \frac{E}{R} \quad [\text{V}] \\ V_C &= \frac{1}{\omega_0 C} I_0 = \frac{1}{\omega_0 C} \frac{E}{R} \quad [\text{V}] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

若谐振, 则  $V_L$  与  $V_C$  大小相等, 相位相反, 因此合成电压  $V_L + V_C = 0$ 。

求  $V_L$  及  $V_C$  与电源电压之比, 可得

$$\frac{V_L}{E} = \frac{\omega_0 L \frac{E}{R}}{E} = \frac{\omega_0 L}{R} \quad \frac{V_C}{E} = \frac{\frac{E}{\omega_0 C R}}{E} = \frac{1}{\omega_0 C R}$$

因而,  $L$  及  $C$  的端电压为电源电压的  $\omega_0 L/R$  倍或  $1/(\omega_0 C R)$  倍。 $V_L$  或  $V_C$  与  $E$  的比值称为电路的  $Q$  值, 简称为  $Q$  值或品质因数。

• **线圈的  $Q$  值** 对于线圈来说,  $Q$  值也是线圈好坏的一个标准, 即  $\omega L/R$  越大, 线圈质量越好。也就是说, 线圈导线电阻越小(分母), 电感越大(分子), 则  $Q$  值越大。但是实际上, 由于分子分母是成比例增减的, 因此很难使分母小而使分子大。即想要增大感抗  $\omega L$ , 则要增加匝数, 而必然线圈电阻  $R$  也增加。收音机等使用的天线线圈的  $Q$  值为 200 ~ 400 左右, 为无名数。

**例 题** 在  $R = 10\Omega$ 、 $L = 10\pi\text{mH}$ 、 $C = \pi/4\mu\text{F}$  的  $RLC$  串联电路加上  $E = 10\text{V}$  的交流电压, 具体计算电压扩大为多少? (设  $\pi^2 \approx 10$ )

解答:  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10\pi \times 10^{-3} \times (\pi/4) \times 10^{-6}}} = 1000\text{Hz}$

$$I_0 = \frac{E}{Z} = \frac{E}{R} = \frac{10}{10} = 1\text{A}$$

$$X_L = \omega L = 2\pi f L = 2\pi \times 10^3 \times 10\pi \times 10^{-3} = 200\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f L} = \frac{1}{2\pi \times 10^3 \times (\pi/4) \times 10^{-6}} = 200\Omega$$

$$V_L = \omega L I = 200 \times 1 = 200\text{V}$$



图 4.76

倍,达到 200V。

$$V_C = \frac{1}{\omega C} I = 200 \times 1 = 200 \text{ V}$$

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{200}{10} = 20$$

$$Q = \frac{1}{\omega C R} = 200 \times \frac{1}{10} = 20$$

——→ 电源电压为 10V 时,  $V_L$  及  $V_C$  为 20

#### 4.9.4 谐振曲线与选择性

在  $RLC$  串联电路中,当  $\omega L = 1/(\omega C)$  时,流过电路的电流为最大。这看起来成为纯电阻电路,而频率越远离谐振频率  $f_0$ ,则电流越小。表示这一变化的曲线称为**谐振曲线**或**谐振特性**,图 4.77 所示即为谐振曲线。

由该曲线可知,只有谐振频率  $f_0$  的电流容易通过,而  $f_0$  以外的电流不容易通过。这种现象称为**选择性**,它的应用领域很广。

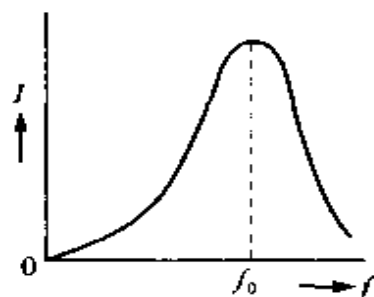
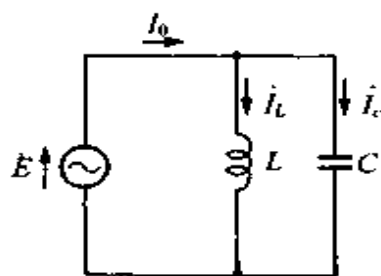


图 4.77 串联谐振曲线

收音机及电视机的选台即是它的一个应用例子,它能从空中传播的无数电波中接收所希望的信号。

• **谐振现象的应用** 为了使电路谐振,可以使  $L$  及  $C$  保持不变,而使频率  $f$  变化。但反过来,也可以使  $L$  或  $C$  改变,而使电路对于某一频率  $f_0$  谐振。这称为**调谐**,可用于收音机及电视机的选台。




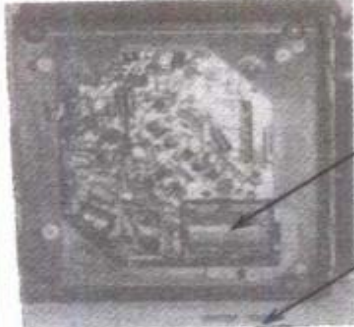
图 4.78  $LC$  并联电路

#### 4.9.5 并联谐振

若求并联电路的电流  $I_L$  及  $I_C$ , 可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_L &= \frac{\dot{E}}{j\omega L} \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{E}}{-j\frac{1}{\omega C}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

表 4.11 收音机及电视机中的谐振现象

收音机	电视机
<p> <math display="block">f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}</math>  </p> <p>可变电容器(与右边的不一样) 有机薄膜可变电容器</p>  <p><b>收音机的元件配置</b> 旋转可变电容器进行调谐。 通过转盘机构带动刻度的指针连动 ⑥另外也有改变 L 进行调谐的, 例如汽车收音机按键式选台方式。</p>	<p> <math display="block">f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}</math>  </p>  <p><b>电视机背面</b> 也可以采用像收音机的转盘机构, 但调谐比较困难, 因此设法利用开关切换, 以便能准确接收电视台。这种切换有切换整个频段电感的旋转式及用切换开关切换电感的按键式。 另外, 也有的通过改变 C 进行电视 UHF 选台。</p>

在  $RLC$  串联电路中, 当满足  $\omega L = 1/(\omega C)$  的条件时, 会产生串联谐振现象。在图 4.78 的  $LC$  并联电路中又将如何? 若式(3)的分母  $\omega L = 1/(\omega C)$ , 则流过  $L$  的电流  $I_L$  与流过  $C$  的电流  $I_C$  大小相等, 但相位相差  $180^\circ$ , 变成  $\dot{I}_L = -\dot{I}_C$ 。而电源电流  $\dot{I}_0$  为两者之

和,因此为零。在  $LC$  并联电路中,当  $I_0$  为零(而  $I_L$  及  $I_C$  不为零)时,称为**并联谐振**或**电流谐振**。这时,根据  $\omega L = 1/(\omega C)$ ,则谐振频率如下所示,它与串联谐振频率相同。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}]$$

即若产生并联谐振,则流过  $L$  及  $C$  的电流  $I_L$  及  $I_C$  大于电源电流。因而若与电源串联电流表,当该电流表偏摆最小时,知道电路产生并联谐振。

并联谐振也可以用于选台等方面。

## 4.10 交流功率与功率因数

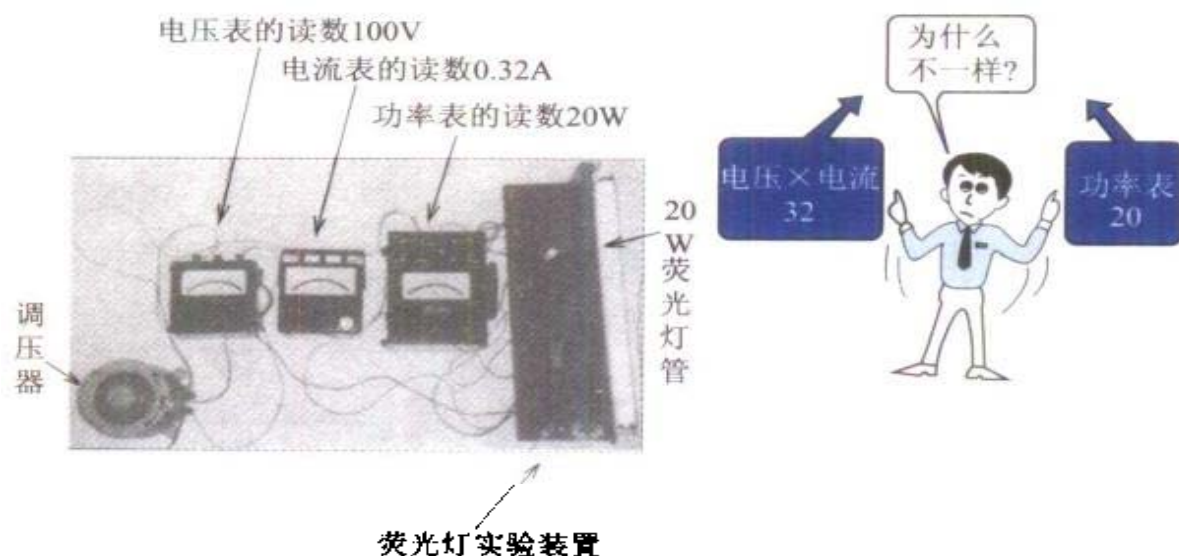


图 4.79 荧光灯实验

### 功率计算式

交流电路功率  

$$P = E \times I \times \cos \varphi [\text{W}]$$



直流电路功率  

$$P = E \times I [\text{W}]$$

图 4.80

### 功率因数

$$P \cdot f = \cos \varphi = \frac{P}{EI} \times 100[\%]$$

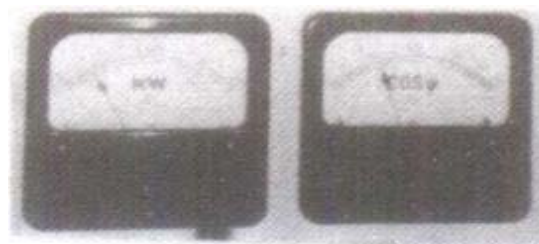
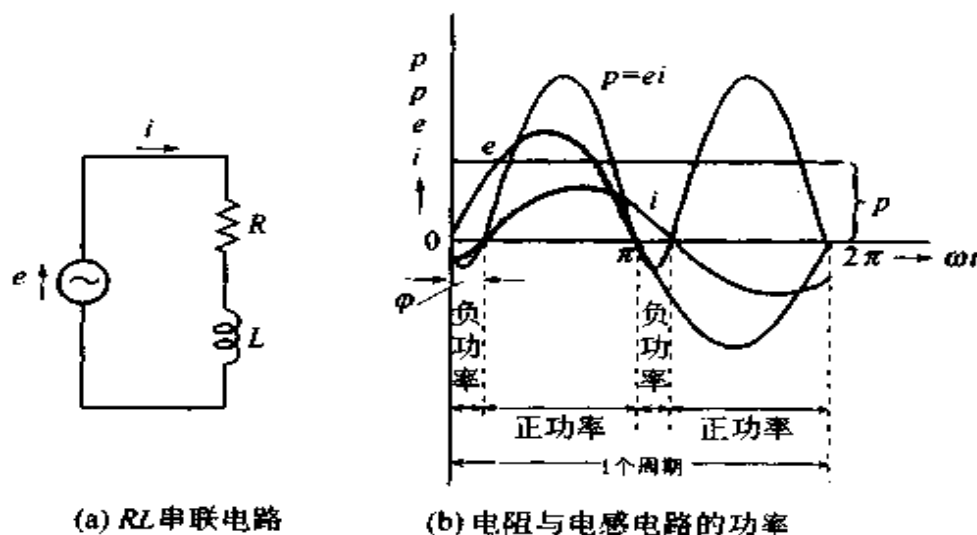


图 4.81 功率表与功率因数表



## 4.10.1 交流电路的功率计算

(a) **RL 电路的功率** 直流电路的功率用电压与电流的乘积  $EI$  来表示。交流电路的电压与电流虽随时间而变,但瞬时功率  $p$  也是用电压与电流的乘积  $ei$  来表示。图 4.82(b) 表示了这一关系,该瞬时功率在 1 个周期中的平均值即为功率  $P$ ,单位用瓦特 (W) 表示。

图 4.82  $RL$  串联电路的功率

• **功率的计算式** 下面来求  $RL$  电路的功率。现设  $e = \sqrt{2}E\sin \omega t$  [V],  $i = \sqrt{2}I\sin(\omega t - \varphi)$  [A], 则瞬时功率  $p$  为

$$\begin{aligned}
 p &= ei = \sqrt{2}E\sin \omega t \cdot \sqrt{2}I\sin(\omega t - \varphi) \\
 &= 2EI\sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi)^{1)} \\
 &= 2EI \times 1/2 [\cos(\omega t - \omega t + \varphi) - \cos(\omega t + \omega t - \varphi)] \\
 &= EI\cos \varphi - EI\cos(2\omega t - \varphi)
 \end{aligned}$$

由于功率  $P$  为  $p$  的平均值, 因此

1) 按照三角函数的和差与积关系公式

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)] \quad (\alpha \rightarrow \omega t, \beta \rightarrow \omega t - \varphi)$$

$$P = p \text{ 的平均} = \underbrace{E \cos \varphi}_{\rightarrow E \cos \varphi} - \underbrace{E \cos(2\omega t - \varphi)}_{\rightarrow 0} \text{ 的平均}$$

$$= E \cos \varphi [\text{W}] \quad (1)$$

上式第 2 项即  $EI \cos(2\omega t - \varphi)$  是最大值为  $EI$ 、按电源频率的 2 倍频率变化且相位滞后  $\varphi$  的余弦波形, 其平均值为零。

(b)  $L$  及  $C$  不消耗功率 图 4.83 所示为纯电感及纯电容电路的电压  $e$ 、电流  $i$  及瞬时功率  $p$  的波形。

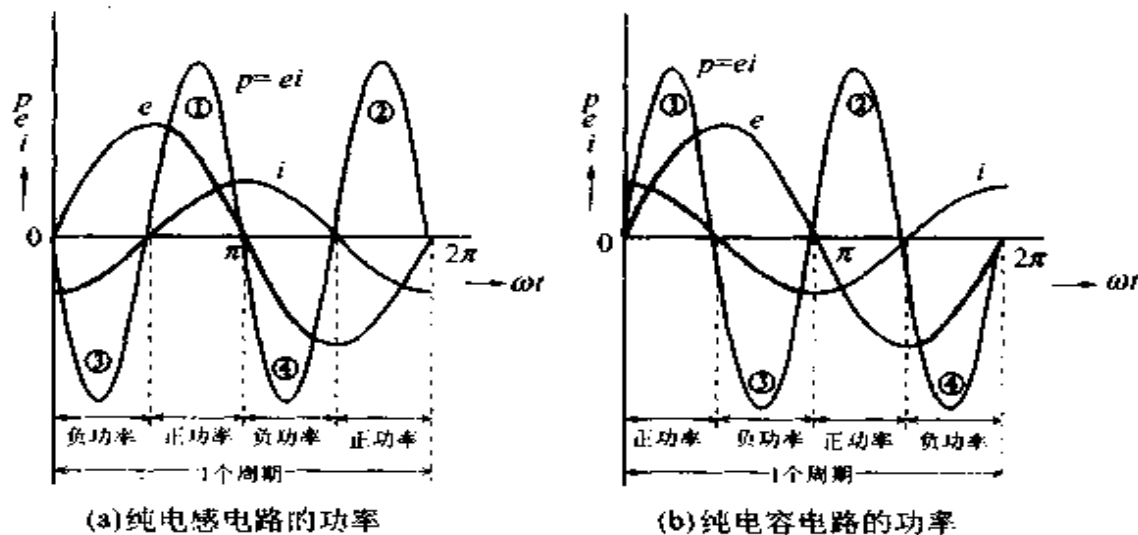


图 4.83 纯电感及纯电容电路的功率

当电压  $e$  与电流  $i$  的相位差为  $\pi/2$  时,  $ei$  的乘积  $p$  每隔  $1/4$  周期, 分别为正功率①、②及负功率③、④。

什么是正功率？什么是负功率？一般所谓功率，当然是指消耗掉发电厂产生的功率，故不特别强调正功率，而仅仅简称为功率。这样所谓负功率，就与上相反，是指送出给发电厂的功率。

图 4.83(a)、(b)的波形中,③、④为负功率,是纯电感及纯电容电路中将①②消耗的功率在下一个  $1/4$  周期内按同样数量送还给电源侧。这当然是  $L$  中产生的反电动势及  $C$  中储存的电荷所起的作用。因此,若将瞬时功率  $p$  加以平均,则功率  $P$  为零。

所以说  $L$  及  $C$  不消耗功率<sup>1)</sup>。



图 4.84 变压器

### 4.10.2 电气设备容量

图 4.84 所示为变压器,在其正面所示的数字 50 到底是什么意思?这是用来表示变压器或交流发电机等电气容量的数字,称为**视在功率**。该视在功率用电压  $E$  与电流  $I$  的乘积表示,单位为伏安(VA)。

视在功率 = 电压  $\times$  电流 [VA]

变压器上的 50 这个数字就表示 50kVA,若使用的电路电压一定,则该数字越大,允许流过的电流就越多。所谓 50kVA 的电气容量,若设电压为 100V,则根据  $50000/100$  计算出能够流过 500A 的电流。

### 4.10.3 什么是功率因数

(a)功率因数 交流功率用  $P = EI \cos \varphi$  表示,即使视在功率  $EI$  一定,若  $\varphi$  变化,则功率也变化。 $\varphi$  为电压与电流的相位差。因而,  $\cos \varphi$  表示  $EI$  产生功率的比例,称为**功率因数**(power factor, 缩写为  $p \cdot f$ )。

$$\text{功率因数}(p \cdot f) = \cos \varphi = \frac{P}{EI}$$

该功率因数的数值范围为  $\cos 0^\circ = 1$  及  $\cos 90^\circ = 0$ , 即  $0 \sim 1$ 。由于有小数点的数不方便,故一般将其扩大 100 倍,常用百分数(%)表示。

$$p \cdot f = \frac{P}{EI} \times 100 \quad [\%]$$

1) 由于实际上总存在电阻部分,因此这是指理论上的纯电感及纯电容不消耗功率。

表 4.12 功率因数的大致范围

负载种类	功率因数	负载种类	功率因数
白炽灯泡	100	三相感应电动机	70 ~ 85
电取暖器	100	电风扇	65 ~ 85
彩色电视机	90 ~ 95	荧光灯	60 ~ 70
立体声收录机	90 ~ 95	交流电焊机	30 ~ 40

(b) 功率因数与电路常数的关系 功率也随功率因数而变, 该功率因数由电路的电压与电流的相位差决定。而相位差由电路的  $R$ 、 $L$ 、 $C$  决定, 因此可得下列关系。现以  $RL$  串联电路为例加以说明。

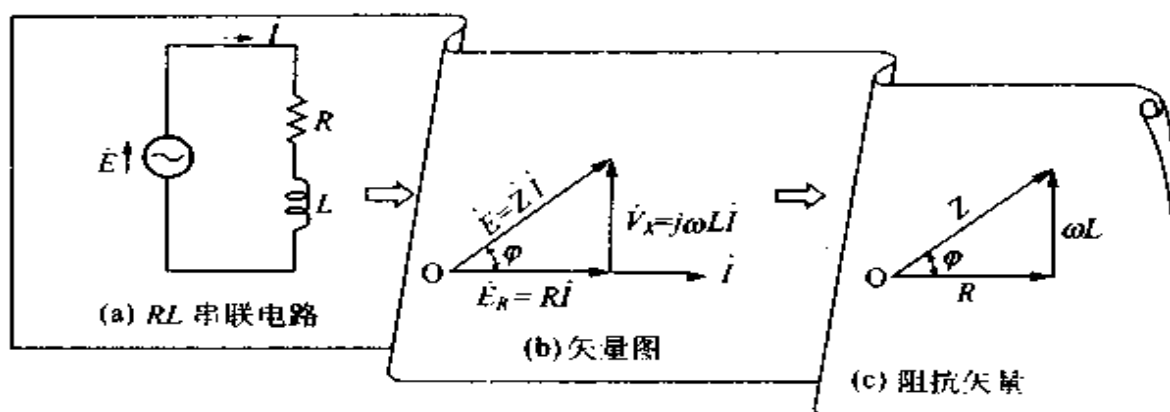


图 4.85 电路常数与阻抗矢量

图 4.85(c) 为已经学习过的阻抗矢量。根据阻抗矢量, 可以用电路常数  $R$  及  $L$  表示功率因数, 具体计算式为

$$\text{功率因数} = \cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

**例 4.8** 在  $E = 100\text{V}$ 、 $R = 8\Omega$ 、 $\omega L = 6\Omega$  的串联电路中, 求功率因数与功率。

解答:  $Z = 8 + j6$

$$Z = |Z| = \sqrt{8^2 + 6^2} = \sqrt{64 + 36} = \sqrt{100} = 10\Omega$$

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{100}{10} = 10\text{A}$$

因此,功率因数与功率为

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{8}{10} = 0.8 \rightarrow 80\%$$

$$P = EI \cos \varphi = 100 \times 10 \times 0.8 = 800\text{W}$$

——功率因数为 80%, 功率为 800W

#### 4.10.4 电力公司与功率因数

电力公司是将使用的电能作为商品加以销售的。电能是用功率与时间的乘积表示,使用的电能数量利用电度表进行累计计算。图 4.86 所示为电度表,一般安装在家庭的进线附近。

电能 = 功率  $\times$  时间 [kW  $\cdot$  h]

• **功率因数偏低带来的问题** 如果从供电一侧来考虑功率因数的好坏,则功率因数偏低将给供电方带来不利的影响。

下面举一个例子,如下所示有两家功率因数不同的 A 家和 B 家。

表 4.13 功率因数与电费举例(1kW  $\cdot$  h 按 18 日元计算)

	电压[V]	电流[A]	功率因数	功率[kW]	时间	电能[kW $\cdot$ h]	电费[日元]
A 家	100	20	100	2	5	10	180
B 家	100	20	50	1	5	5	90

设电压为 100V,使用时间为 5 小时,则从供电方供给的电流多少与电费有关。但是,在表 4.13 中,电压、电流及时间都相同,而电费却不一样。这是因为功率因数不一样。同样送出 20A 电流,从 A 家收取 180 日元电费,而从功率因数 50% 的 B 家,只收

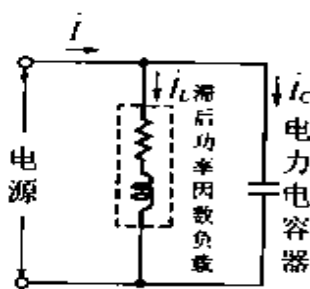
取了一半 90 日元。从供电方来考虑,对于功率因数低的家庭,电费收得少,有损失。而从用电方来说,对于功率因数低的 B 家,若负载达到 2kW,则电流达到 40A,也许限流器(将在后述)会动作而切断电源。

一般以功率因数 85% 为界,85% 以上认为功率因数好,85% 以下认为功率因数差。

在大楼等处大量使用功率因数低的荧光灯的情况,或者供电系统综合功率因数低的情况,可以接入流过超前电流的电力电容器以改善功率因数。图 4.87 所示即为改善功率因数的方法。



图 4.86 电度表(100V)



(a) 并联电力电容器



(b) 电力电容器



(c) 改善功率因数

(三相)

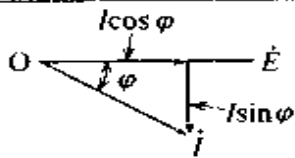
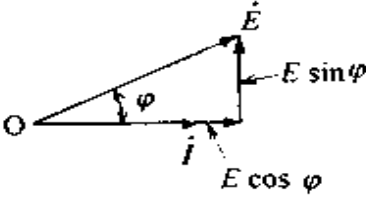
( $\varphi$  变为  $\varphi_0$ )

图 4.87 电力电容器及功率因数改善

#### 4.10.5 功率计算式

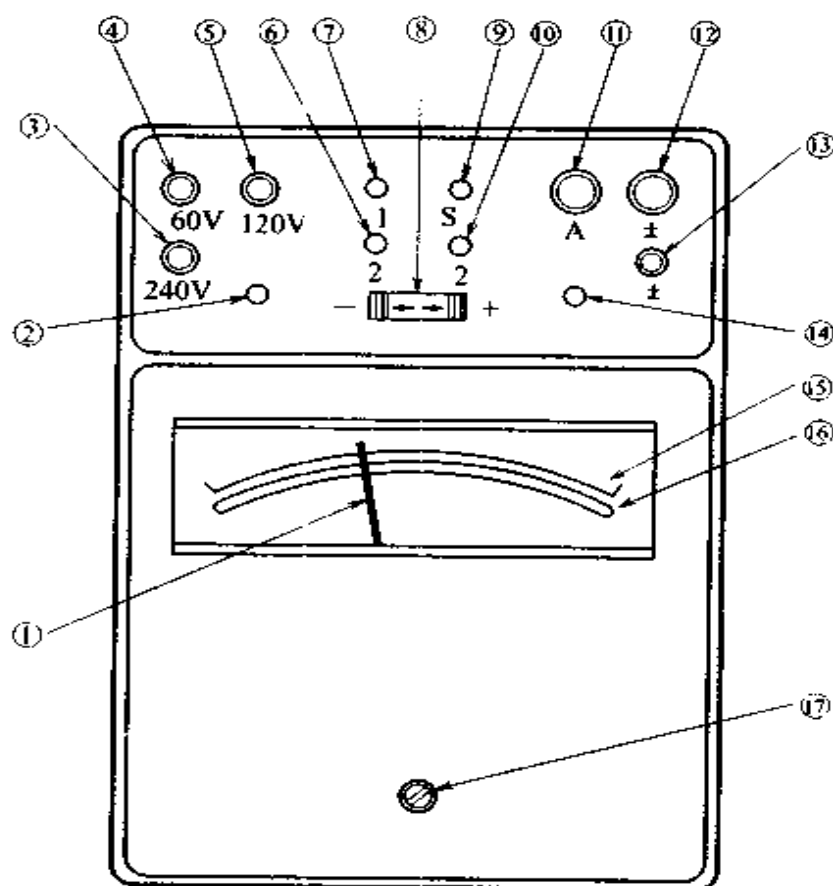
$RL$  串联电路的功率计算式  $P = EI \cos \varphi$  可用表 4.4 中带括号的两种形式表示。另外,可知  $\vec{E} \times \vec{i}$  不是功率。

表 4.14 功率计算式

功率计算式的两种方式	$P = E \times \underbrace{(I \cos \varphi)}$	$P = I \times \underbrace{(E \cos \varphi)}$
矢 量 图		
功率 $P = EI \cos \varphi$	功率是与电压同相的电流分量 $I \cos \varphi$ 与电压的乘积	功率是与电流同相的电压分量 $E \cos \varphi$ 与电流的乘积
结 论	$EI$ 的乘积不是功率(参照矢量图)	

## 4.11 便携式功率表及功率测量

功率表各部分名称



- |               |             |
|---------------|-------------|
| ① 指针          | ⑨ 插头插入孔(短路) |
| ②④ 插头放置孔      | ⑪ 电流线圈端(A)  |
| ③ 电压线圈端(240V) | ⑫ 电流线圈端(±)  |
| ④ 电压线圈端(60V)  | ⑬ 电流线圈端(±)  |
| ⑤ 电压线圈端(120V) | ⑭ 刻度(无名数)   |
| ⑥⑩ 插头插入孔(并联)  | ⑮ 镜面        |
| ⑦ 插头插入孔(串联)   | ⑯ 指针零点调整    |
| ⑧ 指针反转切换开关    |             |

图 4.88 便携式功率表示意图



### 4.11.1 功率表的使用方法

(1) 电流线圈端(⑪、⑫):端子形状较大,或者露出金属部分,很容易辨别。⑫附有 $\pm$ 标记。

(2) 电压线圈端(③~⑤,⑬):形状比电流线圈端小,一端根据电路电压选用,另一端使用带 $\pm$ 标记的⑬。

(3) 短路插头⑨:将插头插入S中,就使电流线圈短路,以防止过电流或指针打断。测量时拔掉。

(4) 电流线圈串联连接(⑦):将插头插入1中,就使两电流线圈串联。

(5) 电流线圈并联连接(⑥、⑩):将插头插入这两处,就使两电流线圈并联。允许流过的电流为串联时的两倍。

(6) 切换开关(⑧):指针反向偏转时进行切换。

### 4.11.2 功率表的接线端与插头

在连接电压表或电流表时,虽然有3~4个接线端,有几种量程,但测量使用的两个端子很容易明白。然而要连接功率表,却有相当多的人接错或不知道怎么接。



图 4.89 接线端的数量

如图4.89(b)所示,功率表的接线端很多,这样可以扩大测量范围,或者可以使指针位于刻度盘的中间部分。

### 4.11.3 功率表的接法

由于功率与电压及电流成正比,因此功率表简单的接线要领是只要当作一个电流表及一个电压表即可。电压线圈端相当于电压表,电流线圈端相当于电流表。图 4.90 所示为功率表的接法。

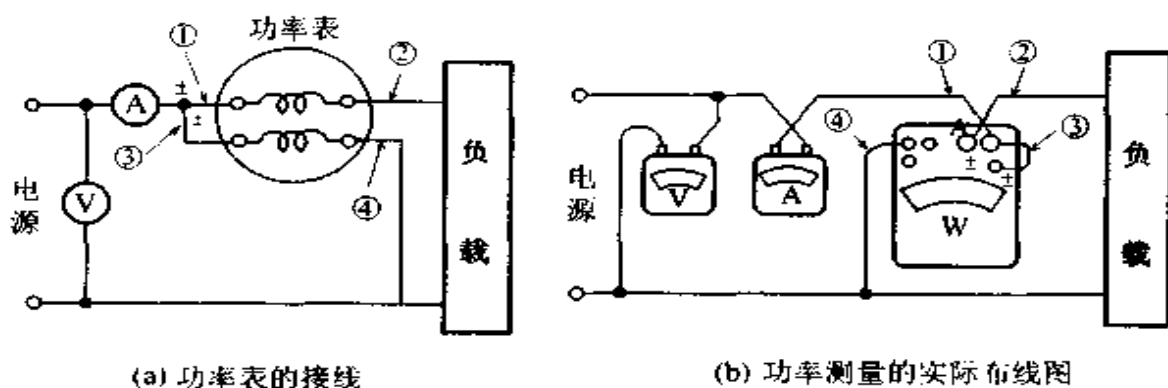


图 4.90 功率表的接法

### 4.11.4 功率表的读数与倍率

仔细看一看功率表的刻度可知,它不是多量程的,为了扩展测量范围,仅有 100 或 120 等数字。因而,指针指示的数值本身不是功率,一般要乘以某个倍率。表 4.15 所示为一例。

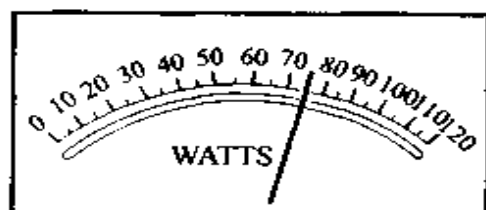


图 4.91 功率表的刻度盘

表 4.15 功率表的倍率

倍率 额定电压 额定电流	乘 数			插头位置
	60 V	120V	240 V	
电流线圈串联 10A	5	10	20	1
电流线圈并联 20A	10	20	40	2,2



由表 4.15 可知,有电流线圈的串联及并联和电压线圈的 60V、120V、240V 共 6 种倍率。根据测量所用的电流线圈及电压线圈的接线端的说明,将功率表读数乘以倍率,才是负载的功率。

**例 题** 功率表的指针偏转如图 4.91 所示。电压线圈为 240V,插头插入 1 中。根据表 4.15 的倍率表,求功率。

**解答:** 由于指针读数为 75,倍率为 20,因此

$$P = 75 \times 20 = 1\,500\text{W}$$

——→ 功率为 1 500W

#### 4.11.5 25/50[A]的含义



图 4.92 功率表外壳上的数字

有人问“这 50 分之 25 安培是什么意思?”。功率表多装在外壳中,然后放在仪表柜里。为了知道电流线圈的额定容量,要一个一个打开外壳盖子,就非常麻烦。所以如图 4.92 所示,在外壳上写明 25/50A,表示电流线圈的额定容量在串联时为 25A,并联时为 50A。电压线圈的额定电压如表 4.15 所示,一般为 60V、120V、240V 三种,已经足够了,因此在外壳上不再标明。

#### 4.11.6 电流线圈及电压线圈的 ± 端

在图 4.88 的⑫及⑬端上标明 ± 标记。一般将 ± 端相互连接,因为如果不规定的话,指针也许不能正确偏转。

某一瞬间流过电压线圈及电流线圈的电流方向如图 4.93 所示,即有四种情况,因此接线端必须标明 ± 标记。

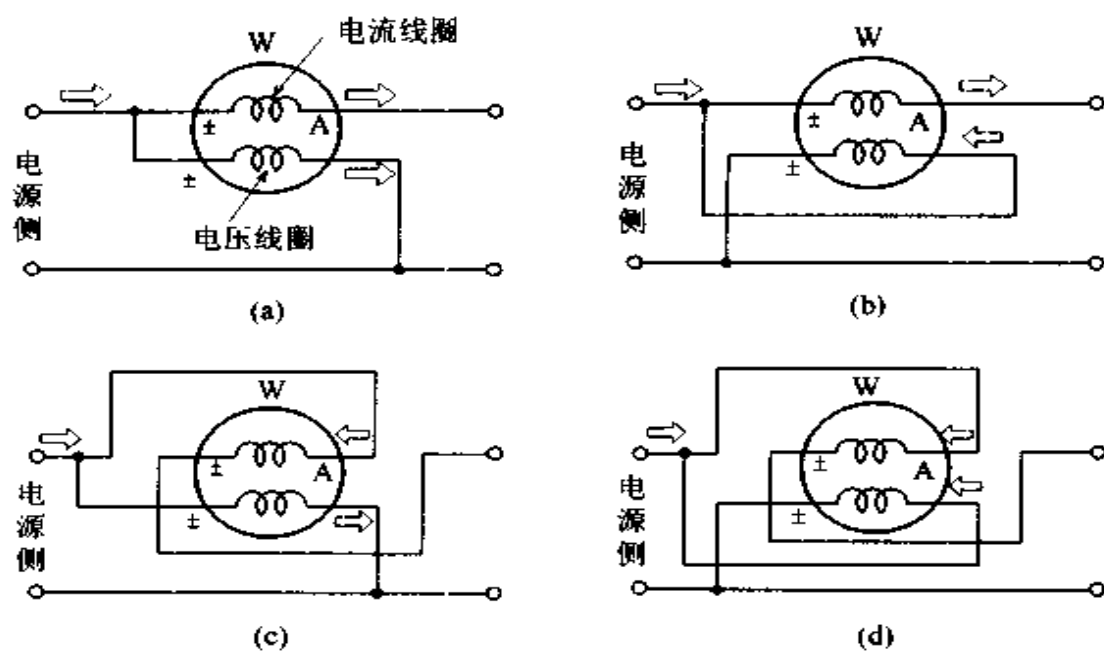


图 4.93 流过功率表线圈的电流方向(左边是电源)

## 4.12 安全用电

### 安全用电

(1) 使用符合电气产品管理法标准的电气产品<sup>1)</sup>。

(2) 注意多路布线的总功率数。

(3) 拔掉电线的时候要拿着电源插头拔掉。

(4) 不采用非正规的使用方法。

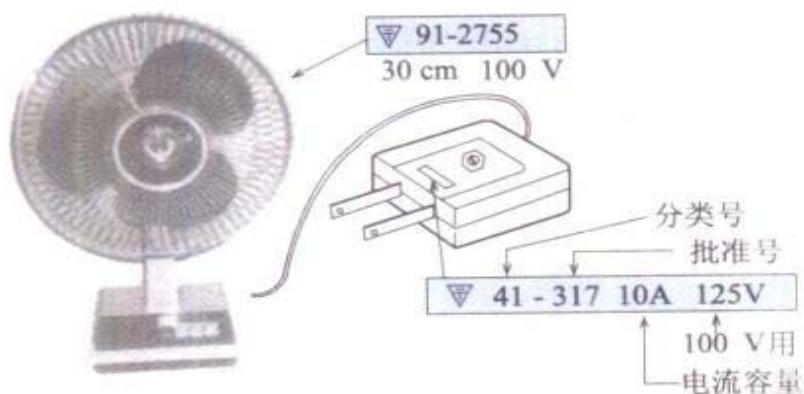


图 4.94 电风扇及电源插头

### 电气产品的 ▽ 及 ⊕ 标记(修改前)

根据 1995 年 7 月 1 日电气产品管理法的修改稿,乙类电气产品可不标明 ⊕ 标记。

另外,根据该修改稿,有 117 种产品从甲类电气产品改为乙类电气产品,其中包括电风扇及电视机。

### 电气产品的分类

表 4.16 电气产品

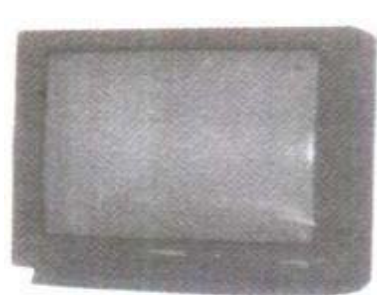
	甲类电气产品	乙类电气产品
规定产品	绝缘电线、线缆管类及附件、熔断器、开关、限流器等	白炽灯泡、荧光灯管、内线自动电话机、电动打字机、收录机、自动售货机、电动工具等
表示内容	型号批准编号、规格、生产厂、其它	规格、生产厂、其它
表示标记	▽	⊕ (现在也可不表示)
生产厂	登记制、型号批准(通产大臣)	申报制(通产大臣)

1) JIS 标记 ⊕ 是日本工业标准,经通商产业省认定。有时也与 ▽ 同时使用。

### 4.12.1 ▽ 标记与 ⊕ 标记

根据电气产品管理法,对于电气产品的制造及销售要规定规格、材料、性能试验、制造厂家登记等内容,以避免触电及火灾等危险。

在该管理法中,电气产品有甲类及乙类两种。甲类有导线、布线用的电器,以及与人体直接接触有危险的医疗设备等。电气产品管理法要求从业者自己负起责任,以保证符合安全标准。图 4.94 所示为根据老标准的电气产品。



▽ 95-4149  
100V 58W  
(a) 彩色电视机



⊕ 100V 2.5W  
(b) 电钟(定时闹钟)

图 4.95 电气产品及标记表示举例

### 4.12.2 注意多路布线

最近的电气产品种类多得让你吃惊。为了方便就多路布线,但是使用时要注意总功率数。

在插线板或电源接头上标明电流安全流过的容量。若不超过该容量,则多路布线决不会有问题。但是从使用角度来说,还要注意插线板的插孔数以及想要使用的电气产品数量。

### 4.12.3 连接处的松动

有时候电气产品的插头及当中的开关发热,热到手都不能接触的程度。若长时间使用,则会使得导线连接处松动,或者由于



发热而烧坏、熔化。因此如果感到稍微有些发热了,则必须要进行检查,并重新加以连接。

另外,不要像图 4.98 那样,不拿着插头而拉着导线来拔插头,这容易使连接处松动。

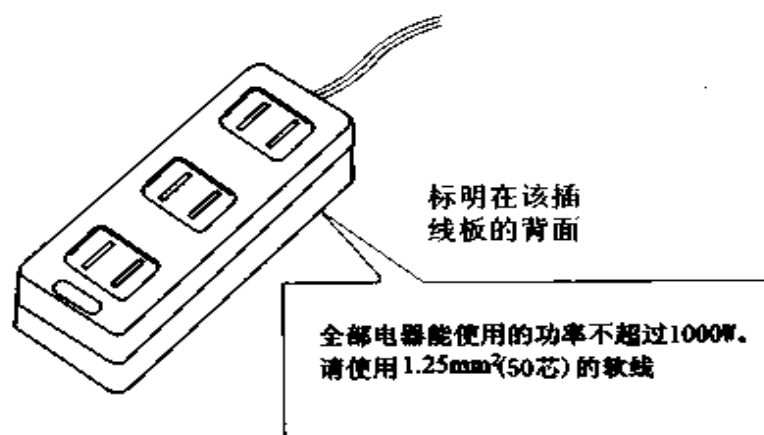


图 4.96 多路布线用插线板



图 4.97 多路布线  
(注意总的功率数)

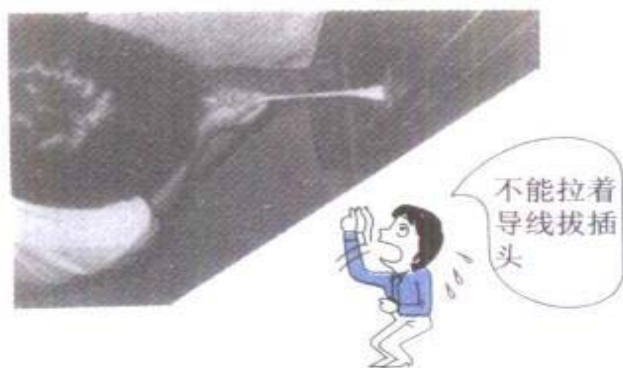


图 4.98 要拿着插头拔电源

#### 4.12.4 注意限流器的颜色

为了安全用电,有一种称为 S 型空气开关(图 4.99)的限流器。这是电力公司安装在用户进线处附近室内一侧的一种开关,若电流超过一定值,则切断电路。这是实施用量制以后采用的,也起到了不流过过大电流的安全装置的作用。

你的家中使用的是什么颜色的开关? 如表 4.17 所示,根据规定电流的不同,外盖颜色也不同,但是因电力公司而异,有的地方也不安装这样的开关。最好你看一下是什么颜色,然后将规定电流与你家最大使用的功率(电流)比较一下。

表 4.17 限流器外盖的颜色

允许电流	外盖颜色
10 A	红
15 A	粉红
20 A	黄
30 A	绿
40 A	灰
50 A	茶色
60 A	紫

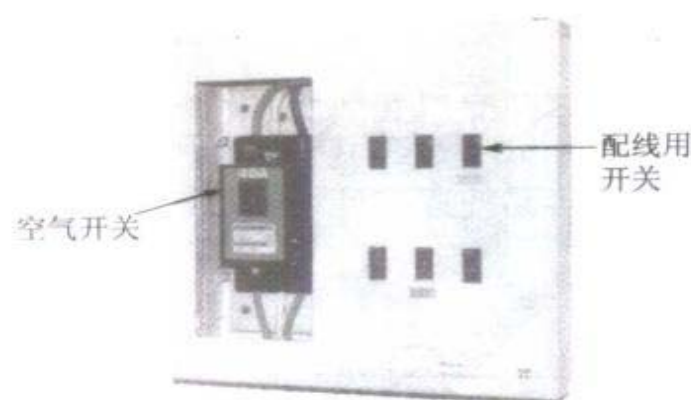


图 4.99 一般家用配电箱



图 4.100 洗衣机与地线

#### 4.12.5 地线连接

一旦电气产品或设备等绝缘损坏而接触到外壳，常常有触电感觉。为了防止这种危险，在下面一些情况必须连接地线（或称为接地线），使外壳与大地等电位。

（1）靠近洗东西的地方，容易沾水的场所。

（2）潮湿的地方。

（3）地面或地板等有水气的地方。

日常生活中这种电气产品有冰箱、洗衣机、空调器、微波炉等。

另外，为了连接地线，要采用将另外的接地棒埋入地中等方法，但必须要注意下面一些情况。

（1）不要接在自来水管上：水龙头虽然是金属的，但当中的管道多用乙烯管，这时就不起接地的作用。

（2）不要接在燃气管道上：由于有引火的危险，因此绝对不能连接。

（3）不要接在电话线的地线上：由于雷击等原因有大电流流过，因此很危险。



# 4.13 为什么采用三相交流？

## 三相交流（三根导线）

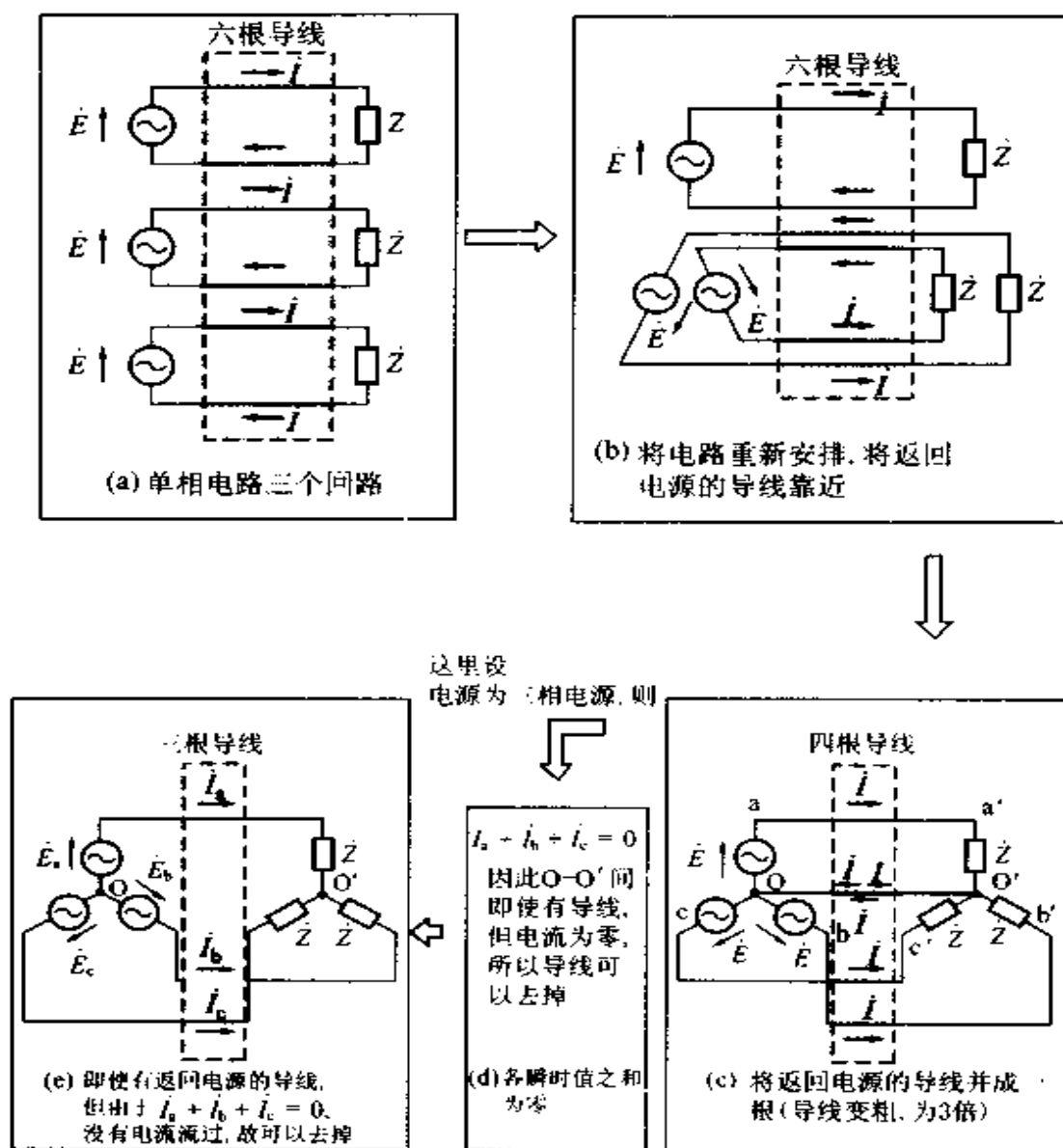


图 4.101 三相交流的形成

### 4.13.1 插座中是两根电线



图 4.102 家庭中的插座

我们家中使用的交流电源,如图 4.102 所示,在电源与负载之间连接了两根电线,这称为单相交流。但是我们到户外去看配电线或输电线,则如图 4.103 ~ 4.105 所示,是三根线或三的倍数。电线多了一根,这称为三相交流,它获得了广泛的应用。

三相交流具有单相交流所没有的性质,除了用于输配电以外,还用于三相感应电动机等各种场合。



图 4.103 高压配电线

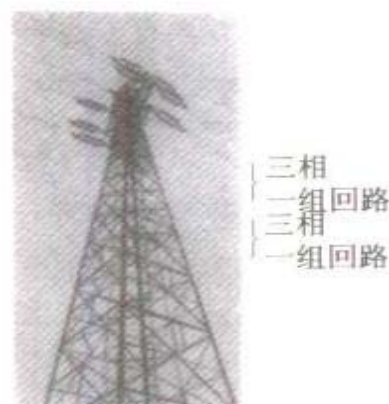


图 4.104 输电线

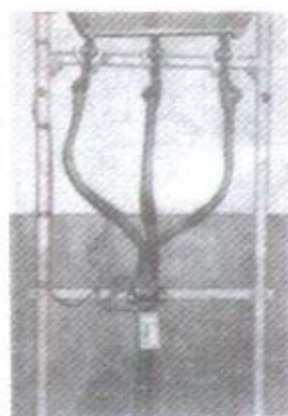


图 4.105 高压进线  
(三相)(地下电缆伸出)

### 4.13.2 三相交流的产生与性质

三相交流是如何产生的呢?前面已经学习过,若使一个线圈在均匀磁场中旋转,则产生正弦交流(单相交流)。因此,若如图 4.106(a)所示,将三个相同的线圈在几何上相差  $2\pi/3$  [rad] (即  $120^\circ$ ) 配置并使其旋转,则各线圈中产生图(b)所示的交流电压,称为三相交流。因而三相交流具有下列的性质:

- (1) 各相大小相等。
- (2) 各相频率相等。

(3) 各相相位差为  $2\pi/3$  ( $120^\circ$ )。

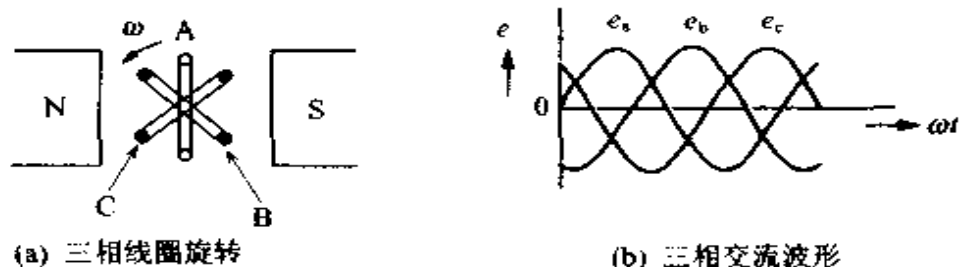


图 4.106 三相交流的产生

### 4.13.3 三相交流的表达方法

表示方法与单相交流相似,但不同点是经常同时表示三个相。

(a) 利用瞬时表达式(电流也采用相同的表示方法)

$$e_a = \sqrt{2}E \sin \omega t \quad [\text{V}]$$

$$e_b = \sqrt{2}E \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad [\text{V}]$$

$$e_c = \sqrt{2}E \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \quad [\text{V}]$$

(b) 利用矢量与复数(电流也采用相同的表示方法)

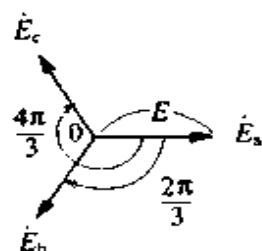


图 4.107

• 极坐标表示

$$\dot{E}_a = E \angle 0 \quad [\text{V}]$$

$$\dot{E}_b = E \angle -\frac{2\pi}{3} \quad [\text{V}]$$

$$\dot{E}_c = E \angle -\frac{4\pi}{3} \quad [\text{V}]$$

• 复数表示

$$\dot{E}_a = E \quad [\text{V}]$$

$$\dot{E}_b = E(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}) \quad [\text{V}]$$

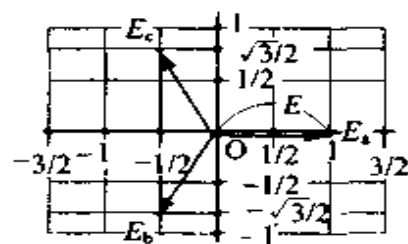


图 4.108

$$\dot{E}_r = E \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \quad [\text{V}]$$

#### 4.13.4 六根导线可以精简为三根

三相交流的三个性质已如前所述,其特征之一是各相电流的瞬时值之和为零。若利用复数表示电流,则如下所示:

$$\begin{aligned} \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c \\ = I + I \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + I \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 0 \end{aligned}$$

三相交流的各相大小因时间而异。图 4.109 的①~⑮瞬间的三相瞬时值之和,如表 4.18 所示,均为零。

表 4.18 三相电流瞬时值(表中省略  $I_m$ )

$\omega t \backslash i$	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮
$i_a$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$
$i_b$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$
$i_c$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
$i_a + i_b + i_c$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

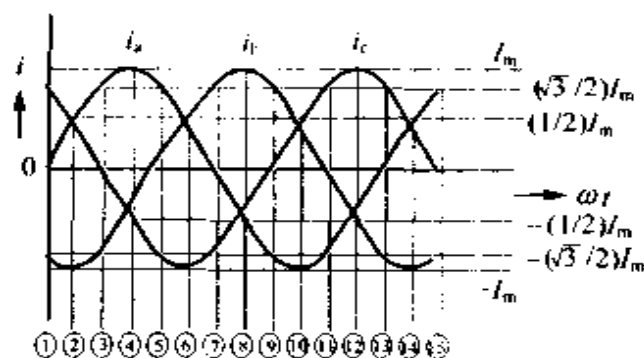


图 4.109 三相电流

上所述,这也是三相交流的一个特点。

巧妙地利用该特征来考虑三相交流,则如图 4.101 所示,用三根导线就相当于单相电路三个回路(六根导线)。

当从发电厂将功率进行传输及配电时,三相交流是效率非常高的线路。如

## 4.13.5 三相交流的相序

图 4.110(a) 及 (b) 的波形看起来虽然相同, 但仔细一看, 发现相的顺序不同。图 (a) 是随时间的变化为  $e_a \rightarrow e_b \rightarrow e_c$ , 而图 (b) 却是  $e_a \rightarrow e_c \rightarrow e_b$ , 即  $b$  相与  $c$  相互相交换。这样的相位滞后的顺序称为相序。

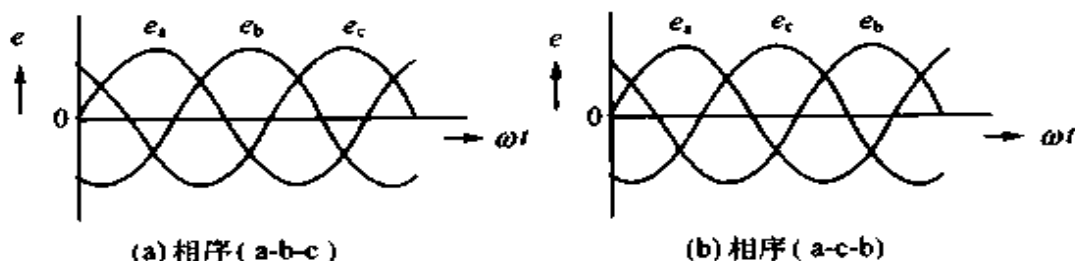


图 4.110 相序相反的三相交流电压

相序将影响三相交流发电机的并联运行, 也会影响三相感应电动机的旋转方向, 要注意相序的问题。

实际上来看我们身边的三相电源, 不知道哪个是  $a$  相, 哪个是  $b$  相。根据需要, 有时如图 4.111 及图 4.112 所示, 标以颜色或符号。另外, 也有的用  $\bigcirc$ 、 $\triangle$ 、 $\square$  来表示三相。

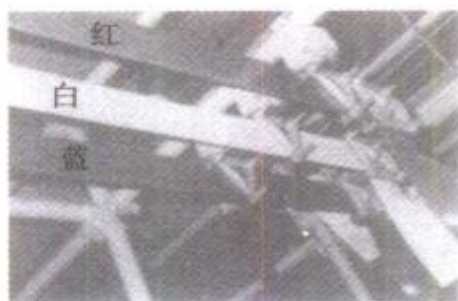


图 4.111 变电所低压母线(铜排)(用红·白·蓝表示三相的例子)

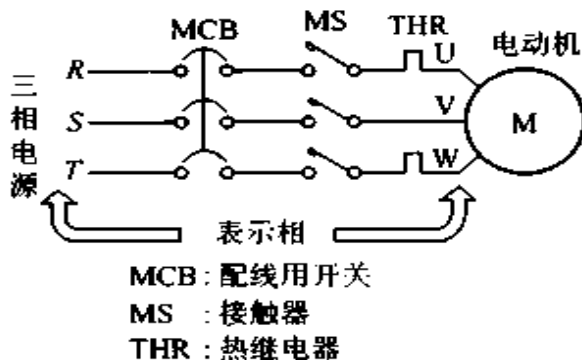


图 4.112 用 RST 及 UVW 表示三相的例子

## 4.14 三相联结的种类

### 三相联结的电压及电流的叫法

(1) 对于各相  $E_a, E_b, E_c \rightarrow$  称为相电压(用  $E_p$  表示)

$I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} \rightarrow$  称为相电流(用  $I_p$  表示)

(2) 对于外线  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} \rightarrow$  称为线电压(用  $V_l$  表示)

$I_a, I_b, I_c \rightarrow$  称为线电流(用  $I_l$  表示)

### 代表性的三相联结

#### • 星形( Y )联结

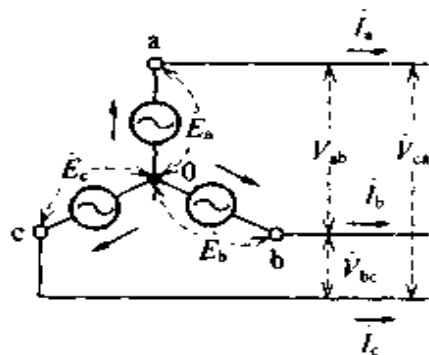


图 4.113

$$\begin{cases} V_l = \sqrt{3}E_p [\text{V}] \\ I_l = I_p [\text{A}] \end{cases}$$

$V_l$  超前于  $E_p$  相位  $\pi/6 (30^\circ)$ 。

#### • 三角形( $\Delta$ )联结

$$\begin{cases} V_l = E_p [\text{V}] \\ I_l = \sqrt{3}I_p [\text{A}] \end{cases}$$

$I_l$  滞后于  $I_p$  相位  $\pi/6 (30^\circ)$ 。

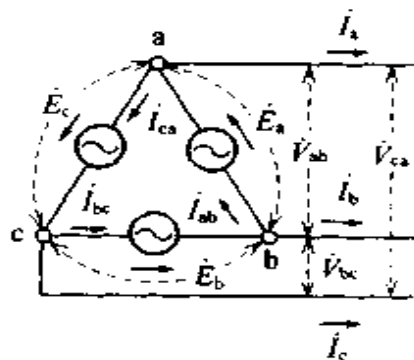


图 4.114

## 4.14.1 星形联结

星形联结是将  $\dot{E}_a$ 、 $\dot{E}_b$ 、 $\dot{E}_c$  三个电源的一端连在一起, 将另一端 a、b、c 引出(图 4.116)。也称为  $\gamma$  联结。

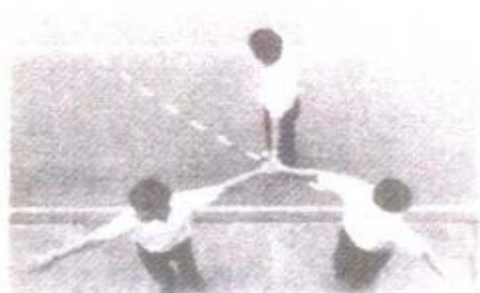


图 4.115  $\gamma$  联结举例(脸的朝向相当于电动势的方向)

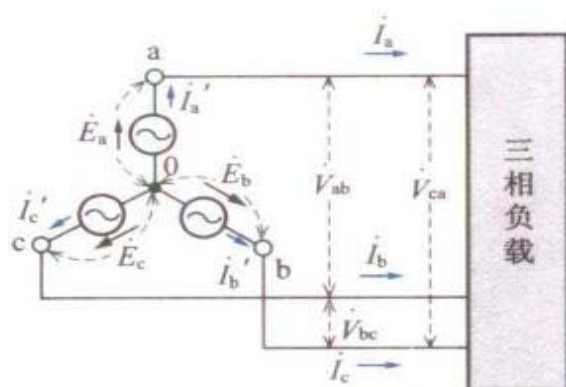


图 4.116  $\gamma$  联结

(a) 相电压与线电压的关系  $\gamma$  联结的相电压与线电压不相同。根据图 4.116, 线电压的矢量关系如下所示:

$$\begin{cases} \dot{V}_{ab} = \dot{E}_a - \dot{E}_b = \dot{E}_a + (-\dot{E}_b)^{(1)} \\ \dot{V}_{bc} = \dot{E}_b - \dot{E}_c = \dot{E}_b + (-\dot{E}_c) \\ \dot{V}_{ca} = \dot{E}_c - \dot{E}_a = \dot{E}_c + (-\dot{E}_a) \end{cases}$$

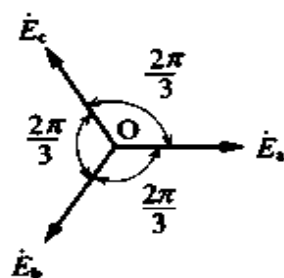


图 4.117  $\gamma$  联结的相电压

式中,  $-\dot{E}_b$  与  $\dot{E}_b$  大小相等, 相位相差  $180^\circ$ 。

以上式为基础, 根据矢量关系求出线电压  $\dot{V}_{ab}$ 、 $\dot{V}_{bc}$ 、 $\dot{V}_{ca}$ , 如图 4.118 所示。再根据该矢量图的一部分求出相电压与线电压的关系, 如图 4.119 所示。

1) 写成矢量和的形式。

• 线电压  $V_l$

$$\begin{aligned}
 V_l &= \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{\left(E_p + E_p \cos \frac{\pi}{3}\right)^2 + \left(E_p \sin \frac{\pi}{3}\right)^2} \\
 &= \sqrt{\left(E_p + \frac{1}{2}E_p\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}E_p\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{3}{2}E_p\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}E_p\right)^2} \\
 &= \sqrt{\frac{12}{4}E_p^2} = \sqrt{3E_p^2} = \sqrt{3}E_p
 \end{aligned}$$

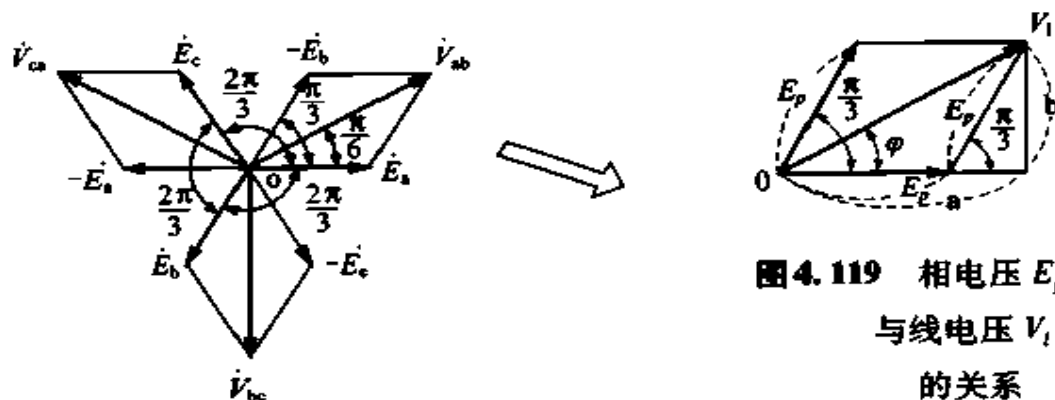


图 4.118 Y 联结的电压矢量图

图 4.119 相电压  $E_p$  与线电压  $V_l$  的关系

•  $V_l$  与  $E_p$  的相位差

$$\begin{aligned}
 \varphi &= \tan^{-1} \frac{b}{a} = \tan^{-1} \frac{(\sqrt{3}/2)E_p}{(3/2)E_p} = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}}{3} \\
 &= \frac{\pi}{6}
 \end{aligned}$$

根据上式可得出下述的关系:

线电压  $= \sqrt{3} \times$  相电压  
 线电压超前于相电压  $\pi/6$  相位

(b) 相电流与线电流的关系

根据图 4.116 可知, 相电流  $i_p$  与线电流  $i_l$  相同, 因此可得出下述的关系:

相电流 = 线电流



## 4.14.2 三角形联结

三角形连接是将  $\dot{E}_a$ 、 $\dot{E}_b$ 、 $\dot{E}_c$  三个电源依次串联形成闭合形式, 再将各连接点作为外线引出(图 4.121), 也称为  $\Delta$  联结。

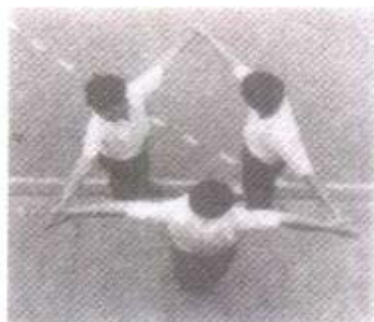


图 4.120  $\Delta$  联结举例  
(脸的朝向相当于  
电动势的方向)

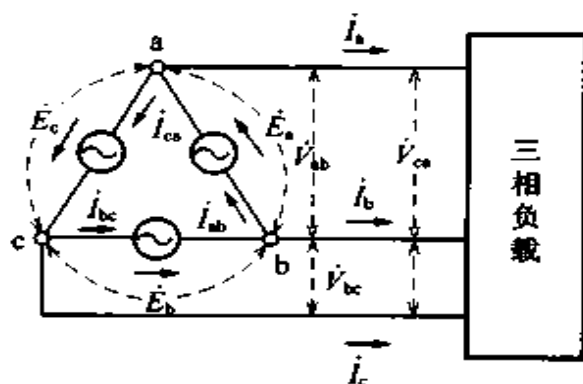


图 4.121  $\Delta$  联结

(a) 相电压与线电压的关系 根据图 4.121 可知, 相电压  $\dot{E}_a$  与线电压  $\dot{V}_{ab}$  相同, 因此可得出下述关系:

相电压 = 线电压

(b) 相电流与线电流的关系  $\Delta$  联结的相电流与线电流不相同。根据图 4.121, 线电流的矢量关系如下所示(例如在点 a 采用基尔霍夫第 1 定律, 则  $\dot{I}_a + \dot{I}_{ca} = \dot{I}_{ab}$ ):

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = \dot{I}_{ab} + (-\dot{I}_{ca}) \\ \dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = \dot{I}_{bc} + (-\dot{I}_{ab}) \\ \dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ca} + (-\dot{I}_{bc}) \end{cases}$$

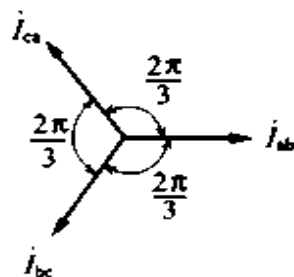


图 4.122  $\Delta$  联结  
的相电流

以上式为基础, 在图 4.123 给出相电流与线电流的矢量关系。再根据该矢量图, 求出相电流与线电流的关系, 结果如下所示(图 4.124)。

• 线电流  $I_l$

$$\begin{aligned}
 I_l &= \sqrt{a^2 + b^2} \\
 &= \sqrt{\left(I_p + I_p \cos \frac{\pi}{3}\right)^2 + \left(I_p \sin \frac{\pi}{3}\right)^2} \\
 &= \sqrt{\left(I_p + \frac{1}{2}I_p\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}I_p\right)^2} = \sqrt{3}I_p
 \end{aligned}$$

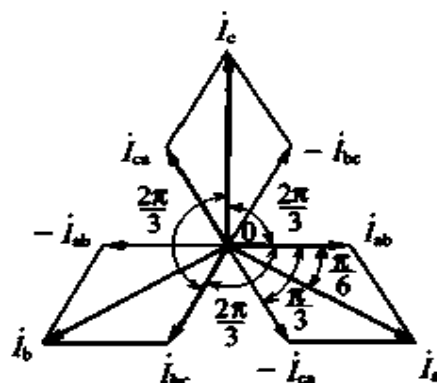


图 4.123 Δ 联结的电流矢量图

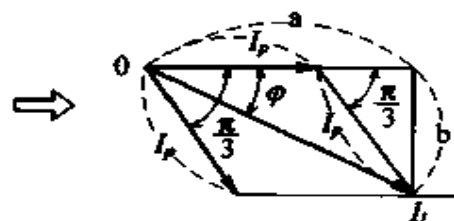


图 4.124 相电流  $I_p$  与线电流  $I_l$  的关系

•  $I_p$  与  $I_l$  的相位差

$$\begin{aligned}
 \varphi &= \tan^{-1} \frac{b}{a} = \tan^{-1} \frac{(\sqrt{3}/2)I_p}{(3/2)I_p} \\
 &= \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}}{3} = \frac{\pi}{6}
 \end{aligned}$$

根据上式可得出下述关系：

线电流  $= \sqrt{3} \times$  相电流  
 线电流滞后于相电流  $\pi/6$  相位

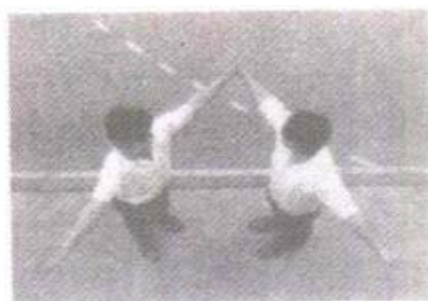


图 4.125 V 联结举例(脸的朝向相当于电动势的方向)

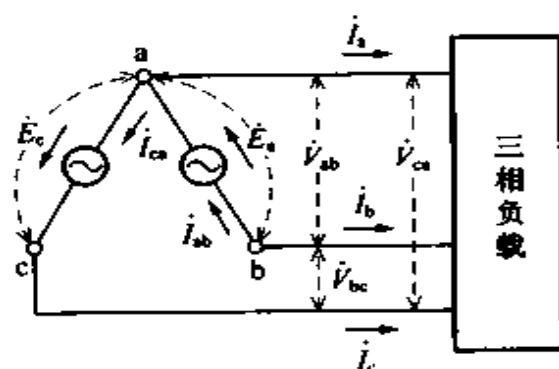


图 4.126 V 联结

### 4.14.3 V 联结

V 联结如图 4.126 所示,是拿掉  $\Delta$  联结的一个相电压(例如是 bc 间),但是即使这样,也还是三相交流电压,这是 V 联结的特点。

V 联结的  $\dot{V}_{bc}$  间电压如图 4.127 所示,可重新改写如下:

$$\dot{V}_{cb} = (\dot{E}_a + \dot{E}_c)$$

所以  $\dot{V}_{bc} = -(\dot{E}_a + \dot{E}_c)$

另外,  $\Delta$  联结的相电压存在  $\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = 0$  的关系,因此  $\dot{E}_b = -(\dot{E}_a + \dot{E}_c)$ ,即与上式相同,因此可知 V 联结的 bc 间电压与  $\Delta$  联结的 bc 间电压相等。

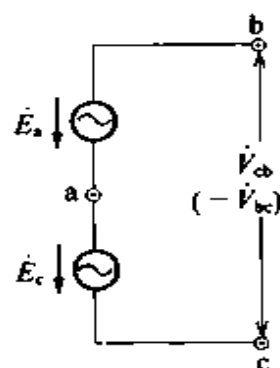


图 4.127 bc 间的电压

相电压 = 线电压

$$\dot{I}_{ab} = -\dot{I}_b \quad \dot{I}_{ca} = \dot{I}_c$$

### 4.14.4 三相联结的组合

图 4.128 所示为各种三相联结组合的例子。

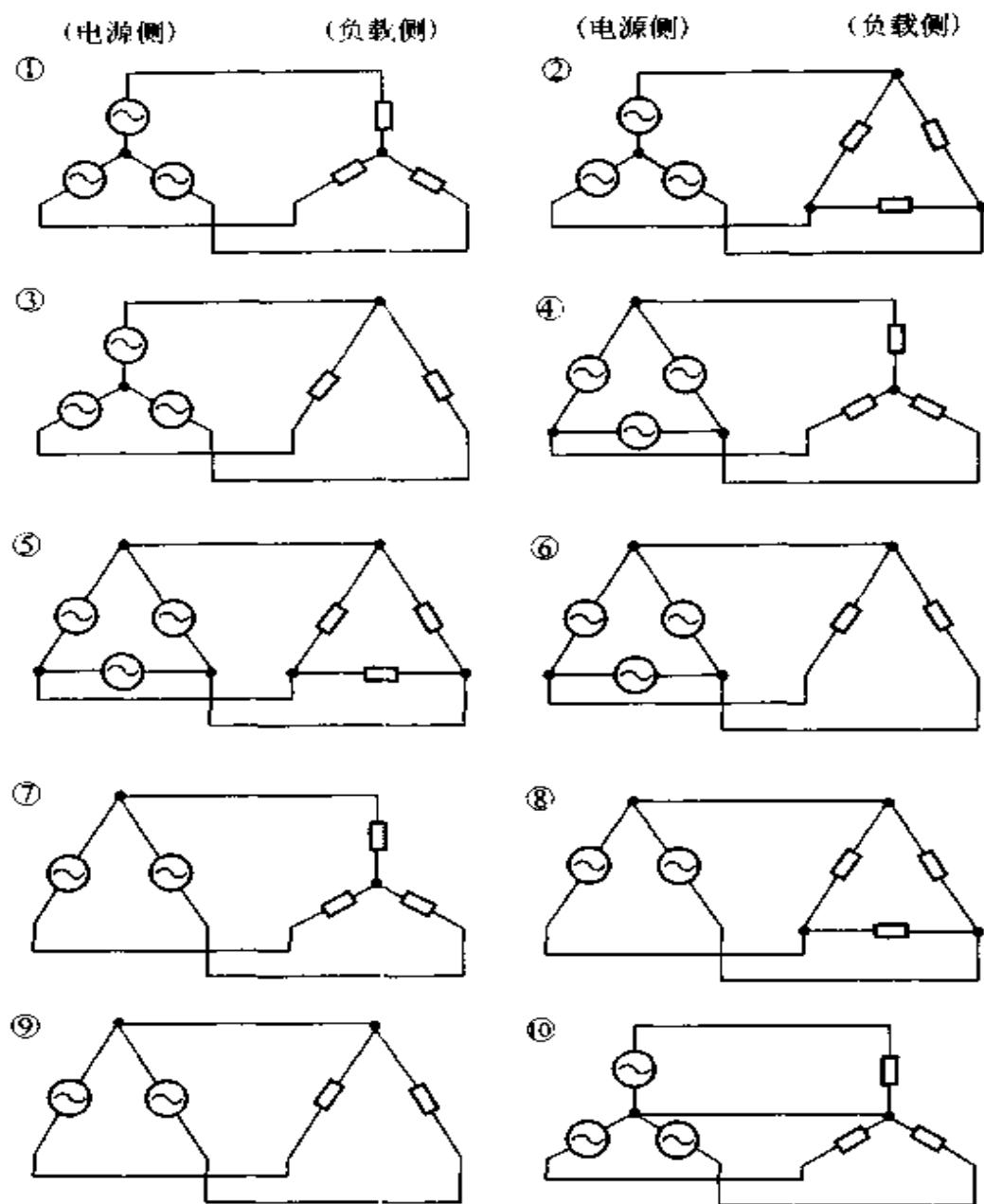


图 4.128 各种三相联结的组合

# 4.15 三相交流电路的基本计算

## Y-Y 电路计算举例

**例题** 在图 4.129 的对称三相电路中, 线电压为  $100\sqrt{3}\text{V}$ , 求流过负载的电流大小。

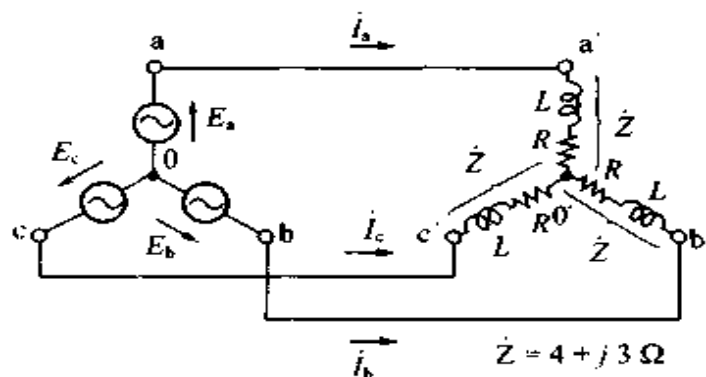


图 4.129

**解答:** 由于相电压  $E_p$  为线电压的  $1/\sqrt{3}$ , 因此

$$E_p = \frac{V_l}{\sqrt{3}} = \frac{100\sqrt{3}}{\sqrt{3}} = 100\text{V}$$

一相的阻抗  $\dot{Z}$  为

$$\dot{Z} = 4 + j3\Omega$$

$$|\dot{Z}| = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5\Omega$$

因此流过负载的相电流

$I_p$  为

$$I_p = \frac{E_p}{Z} = \frac{100}{5} = 20\text{A}$$

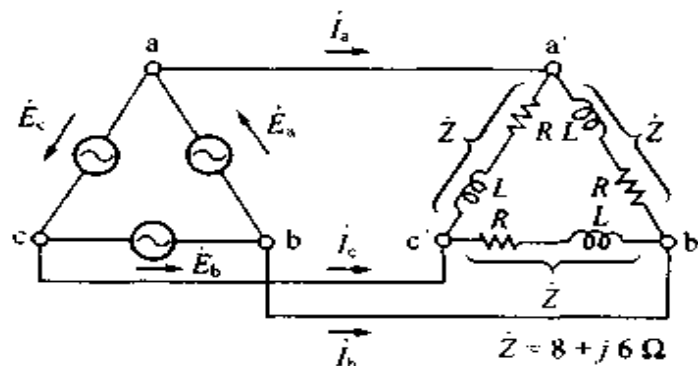


图 4.130

**△-△电路计算举例**

**例题** 在图 4.130 的对称三相电路中, 线电压为  $100\sqrt{3}\text{V}$ , 求线电流的大小。

**解答:** 一相的阻抗  $\dot{Z}$  为

$$\dot{Z} = 8 + j6\Omega$$

$$|\dot{Z}| = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10\Omega$$

由于线电压加在该一相阻抗上, 因此相电流  $I_p$  为

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{V_l}{Z} = \frac{100\sqrt{3}}{10} \\ &= 10\sqrt{3}\text{A} \end{aligned}$$

由于线电流  $I_l$  为相电流的  $\sqrt{3}$  倍, 因此

$$\begin{aligned} I_l &= 10\sqrt{3} \times \sqrt{3} \\ &= 30\text{A} \end{aligned}$$

Y-△电路计算举例

**例题** 在图 4.131 的对称三相电路中, 相电压为  $100\text{V}$ , 求线电流的大小。

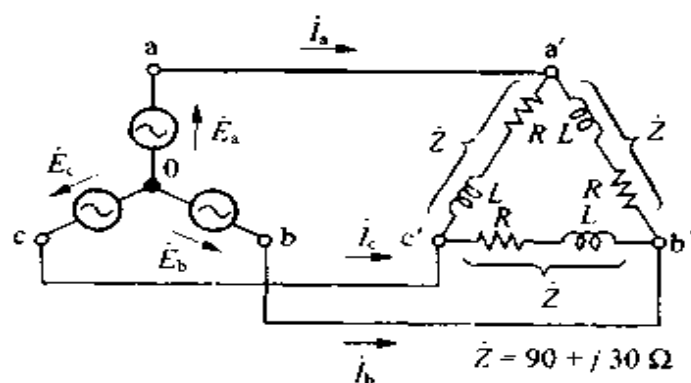


图 4.131

**解答:** 将负载的△联结变换为Y联结(参见本章 4.15.5 小节), 阻抗为△联结的  $1/3$ , 形成Y-Y电路

一相的阻抗  $\dot{Z}$  为

$$\begin{aligned} \dot{Z}_Y &= \frac{\dot{Z}}{3} = \frac{90 + j30}{3} \\ &= 30 + j10\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |\dot{Z}_Y| &= \sqrt{30^2 + 10^2} \\ &= \sqrt{1000} = 10\sqrt{10}\Omega \end{aligned}$$

线电流(相电流)  $I_l$  为

$$I_l = \frac{100}{10\sqrt{10}} = \frac{10}{\sqrt{10}} = \sqrt{10}\text{A}$$

#### 4.15.1 对称三相电路

将Y联结或△联结的负载与三相交流电源连接,该电路即称为三相交流电路,有对称三相电路及不对称三相电路两种。

(电源)                      (负载)                      (电流)

对称三相电路→对称三相电压~各相阻抗相同~对称三相电流

不对称三相电路<sup>1)</sup>→对称三相电压~各相阻抗不相同~不对称三相电流

对称电路如图4.132所示,由于所加电压是大小及频率相等而相位相差 $2\pi/3$ 的所谓对称三相电压,因此流过的电流也是大小及频率相等而相位相差 $2\pi/3$ 的对称三相电流。

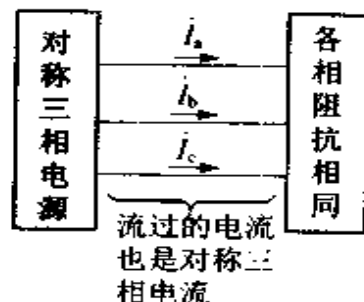


图4.132 对称三相电路

不对称电路的电源即使是对称三相电压,但由于各相负载的大小不同,因而流过电流的大小也不同,相位差也不是 $2\pi/3$ 。

该不对称电路的计算比较复杂,因此下面仅学习基本的Y-Y电路、△-△电路、Y-△电路、△-Y电路等对称电路的计算方法。

#### 4.15.2 Y-Y电路

三根导线是三相交流的一个特征,但为了求解该Y-Y电路的电流,如图4.133(a)所示考虑三相四线制方式。O及O'点称为中点,连接中点的连线称为中性线。

1) 即使各相阻抗相等,若电源为不对称三相电源,则也构成不对称三相电路。

流过中性线的线电流  $\dot{I}_a$ 、 $\dot{I}_b$ 、 $\dot{I}_c$  之和为零, 但三个线电流不为零。采用了中性线的方法, 则如图 4.133(b) 所示, 就可以作为单相电源及负载这样的简单电路来考虑。因而各相都相同, 这样可简单求得线电流为  $\dot{I}_a = \dot{E}_a / \dot{Z}$ ,  $\dot{I}_b = \dot{E}_b / \dot{Z}$ ,  $\dot{I}_c = \dot{E}_c / \dot{Z}$ 。

设  $|\dot{E}_a| = |\dot{E}_b| = |\dot{E}_c| = E$ , 则相电流与线电流的计算式如下所示:

### 线电流

$$\dot{I}_a = \frac{E / 0}{\dot{Z}} \quad [\text{A}]$$

$$\dot{I}_b = \frac{E / -(2\pi/3)}{\dot{Z}} \quad [\text{A}]$$

$$\dot{I}_c = \frac{E / -(4\pi/3)}{\dot{Z}} \quad [\text{A}]$$

### 相电流

根据 Y 联接的性质, 线电流与相电流相同, 因此相电流也与上式右边相同。

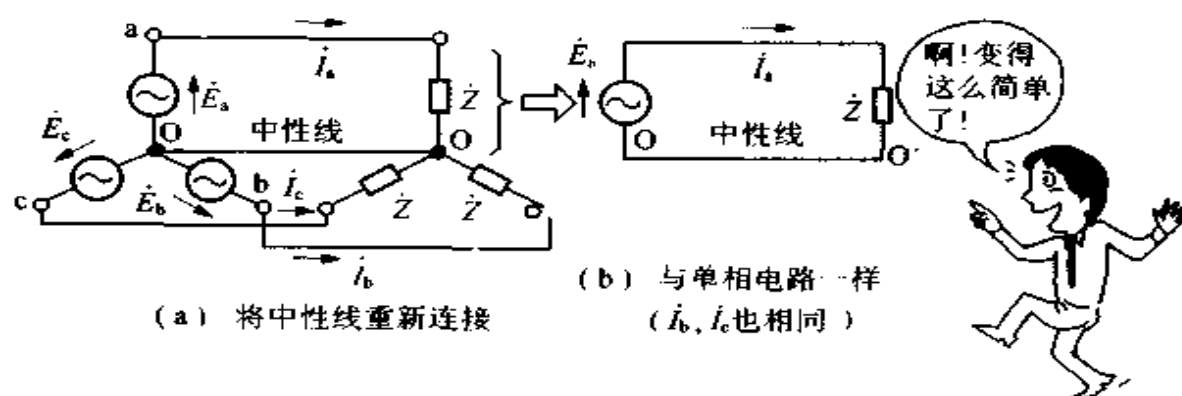


图 4.133 Y-Y 电路的电流计算方法

### 4.15.3 $\Delta$ - $\Delta$ 电路

由于  $\Delta$ - $\Delta$  电路中各相负载所加电压分别为线电压(相电压),



则也可以看成分解为图 4.134(b)、(c)、(d) 那样的单相电路。因而,能求出粗线对应的电源及负载的相电流,这样就可以根据相电流求出细线对应的线电流  $\dot{I}_a$ 、 $\dot{I}_b$ 、 $\dot{I}_c$ 。

设  $|\dot{V}_{ab}| = |\dot{V}_{bc}| = |\dot{V}_{ca}| = V$ ,  $|\dot{I}_{ab}'| = |\dot{I}_{bc}'| = |\dot{I}_{ca}'| = I_p$ , 则相电流与线电流的计算式如下所示:

**相电流**  $\dot{I}_{ab}' = \frac{V/\angle 0}{\dot{Z}} = I_p \angle \varphi \quad [\text{A}]$

$$\dot{I}_{bc}' = \frac{V/\angle -(2\pi/3)}{\dot{Z}} = I_p \angle -(2\pi/3) - \varphi \quad [\text{A}]$$

$$\dot{I}_{ca}' = \frac{V/\angle -(4\pi/3)}{\dot{Z}} = I_p \angle -(4\pi/3) - \varphi \quad [\text{A}]$$

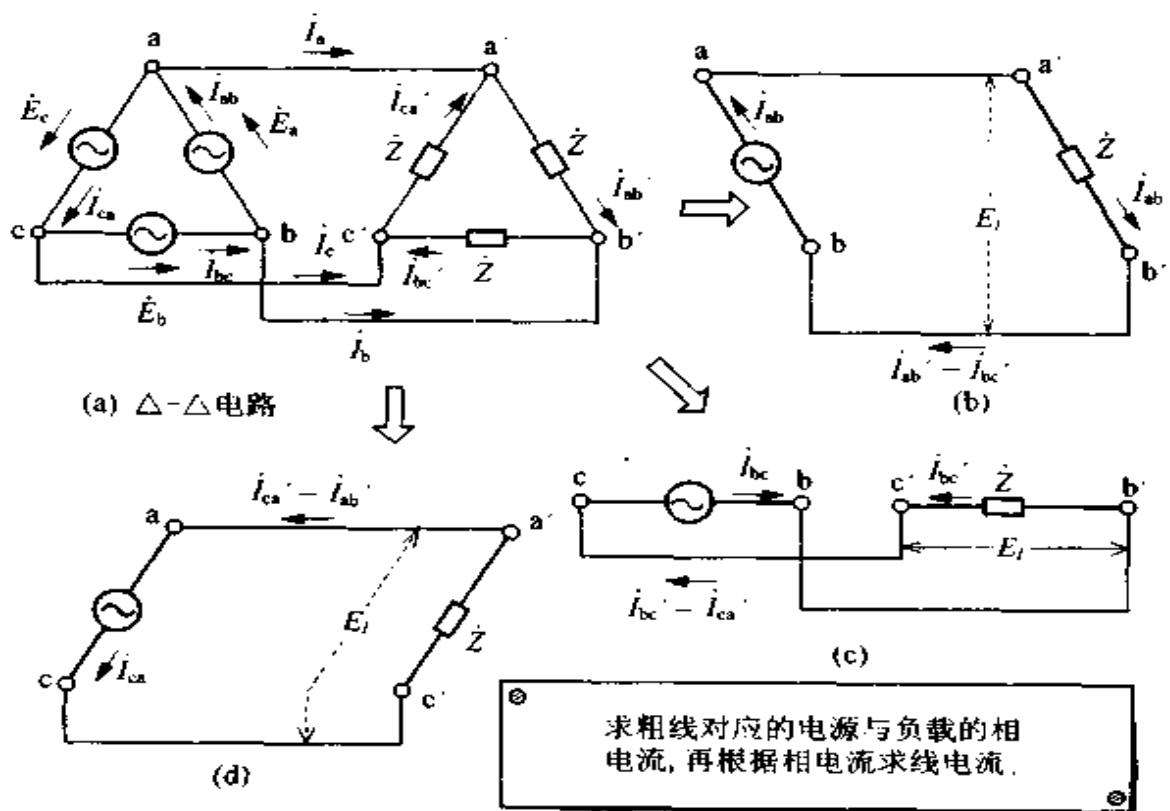


图 4.134  $\Delta$ - $\Delta$  电路的电流计算方法

**线电流** 根据 $\Delta$ 联接的性质,线电流大小为相电流的 $\sqrt{3}$ 倍,相位滞后 $\pi/6$ 。

$$\dot{i}_a = \sqrt{3}I_p \angle -\frac{\pi}{6} - \varphi \quad [\text{A}]$$

$$\dot{i}_b = \sqrt{3}I_p \angle -\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6} - \varphi \quad [\text{A}]$$

$$\dot{i}_c = \sqrt{3}I_p \angle -\frac{4\pi}{3} - \frac{\pi}{6} - \varphi \quad [\text{A}]$$

#### 4.15.4 Y- $\Delta$ 电路及 $\Delta$ -Y电路

电源与负载联接方式不同的电路与上述的Y-Y电路及 $\Delta$ - $\Delta$ 电路略有不同。因而为方便起见,只要进行Y与 $\Delta$ 变换,使电源与负载采用相同联接方式即可求解。电源及负载两边都可变换,这要根据电路或题意进行判断。

但是当然也可不一定进行变换,可根据电路联接的性质进行求解。

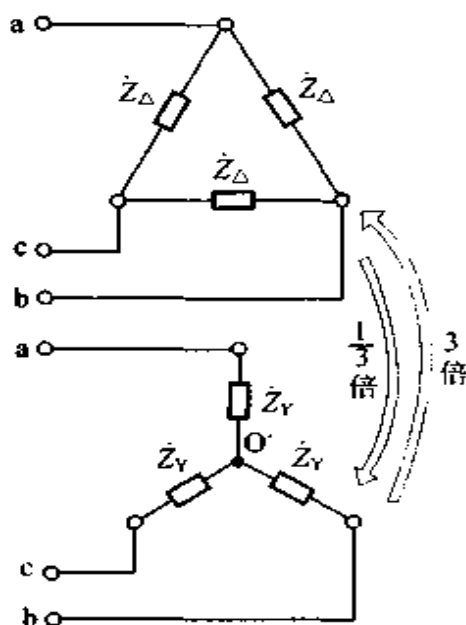


图 4.135 相互变换

#### 4.15.5 Y- $\Delta$ 的相互变换

使 $\Delta$ 联结与Y联结的ac端来看的等效阻抗 $\dot{Z}_{\Delta ac}$ 与 $\dot{Z}_{Yac}$ 相等,就能够作为等效阻抗进行变换。

设 $\dot{Z}_\Delta = 30[\Omega]$ , 则

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{\Delta ac} &= \frac{\dot{Z}_\Delta \times (\dot{Z}_\Delta + \dot{Z}_\Delta)}{\dot{Z}_\Delta + (\dot{Z}_\Delta + \dot{Z}_\Delta)} \\ &= \frac{30 \times 60}{30 + 60} = 20[\Omega] \end{aligned}$$

$$\dot{Z}_{Yac} = \dot{Z}_Y + \dot{Z}_Y = 2\dot{Z}_Y$$

令上两式相等,来求 $\dot{Z}_Y$ , 则


$$2\dot{Z}_Y = 20$$

所以

$$\dot{Z}_Y = 10\Omega$$

由上式可知

$$\dot{Z}_\Delta = 3\dot{Z}_Y \quad \text{或} \quad \dot{Z}_Y = 1/3\dot{Z}_\Delta$$

 试将一相阻抗为  $90 + j30\Omega$  的  $\Delta$  联结变换为  $Y$  联结。

解答：由于  $\Delta \rightarrow Y$  的变换是  $1/3$  倍，因此一相阻抗为

$$Z_Y = \frac{Z_\Delta}{3} = \frac{90 + j30}{3} = 30 + j10\Omega$$

$$\longrightarrow 30 + j10\Omega$$

•  $Y \leftrightarrow \Delta$  相互变换的记忆方法 相互变换常数为 3 或  $1/3$ 。

即比较难记住的是变大(3 倍)还是变小( $1/3$ )。从  $Y$  及  $\Delta$  的形状来看， $\Delta$  这个符号是封闭的，因此有面积。而与此相反， $Y$  这个符号不是封闭的，因此没有面积。可以以该面积为提示就能记住。但是这是指对称负载的情况。

$\Delta \rightarrow Y$	面积消失	$\rightarrow$ 变小	$\rightarrow 1/3$
$Y \rightarrow \Delta$	面积增加	$\rightarrow$ 变大	$\rightarrow 3$ 倍

## 4. 16 三相交流电路的功率及测量

### 三相功率的测量方法

与两根线的单相不同, 三根线的情况下如何测量功率?

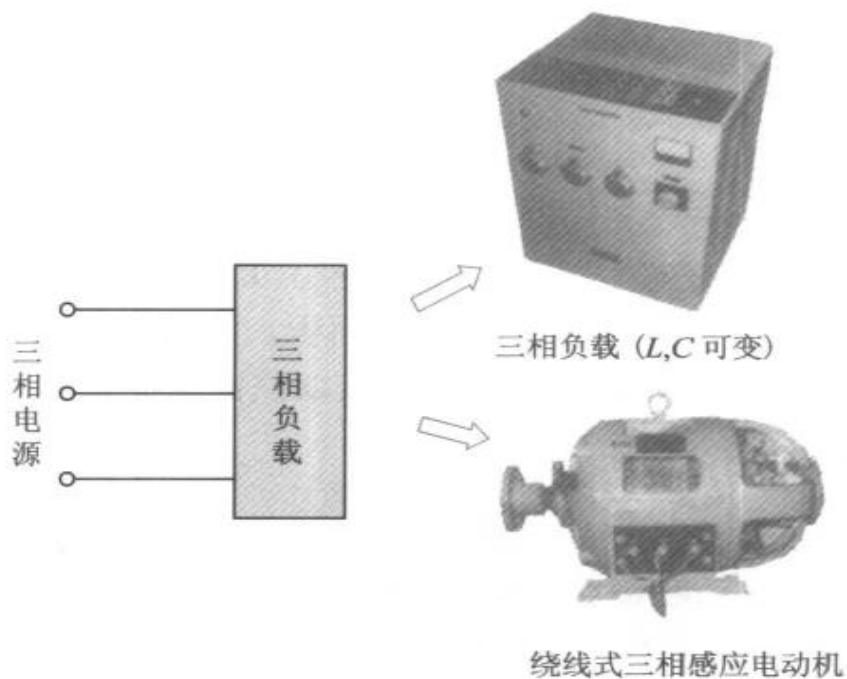


图 4. 136 三相电路

### 功率测量法

- (1) 用电压表、电流表、功率表进行测量。
- (2) 用两个单相功率表进行测量(两功率表法)。
- (3) 用三相功率表进行测量。

## 4.16.1 三相功率

单相功率用电压、电流及功率因数之积来表示,三相功率也基本如此。

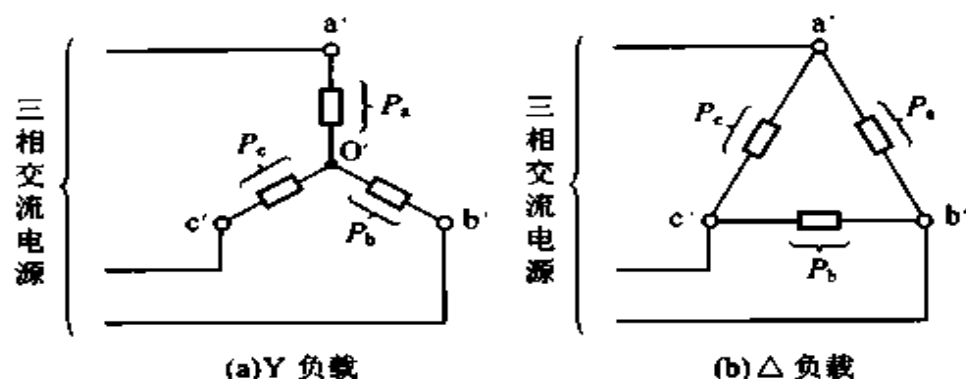


图 4.137 三相功率

如图 4.137(a) 及 (b) 所示,三相功率  $P$  用各相功率之和来表示,如下所示。

$$P = P_a + P_b + P_c \quad [\text{W}]$$

电路若为对称三相电路,则为一相功率  $P_p$  的 3 倍,因此也可以用下式表示。

$$P = 3P_p = 3E_p I_p \cos\varphi \quad [\text{W}] \quad (1)$$

4.16.2 功率公式中的常数 3 与  $\sqrt{3}$  的区别

一相的功率如何测量为好,下面来看三个具体例子,如图 4.138 所示。

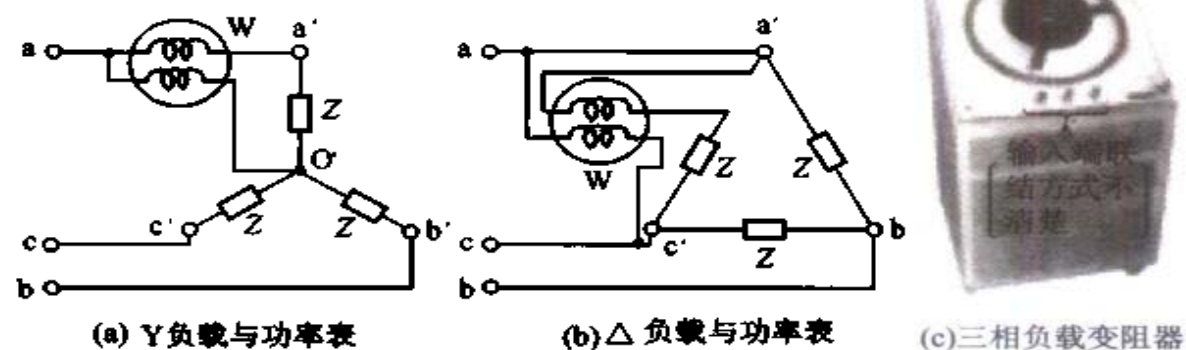


图 4.138 负载的种类及功率表

表 4.19 各种三相负载的功率测量

图 4.138(a)的情况	图 4.138(b)的情况	图 4.138(c)的情况
由于有中点,因此测量一相的功率,它的 3 倍即为三相功率	由于是 $\Delta$ 联结,所以为了测量一相电流,必须将该相电路暂时切断,再串入电流线圈。一相功率的 3 倍为三相功率。	若联结方式不清楚或不同联结方式并联的负载,则不知道将电流线圈接在哪里才好。

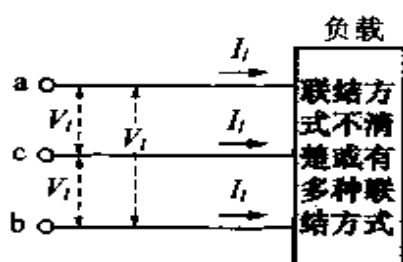


图 4.139

上面给出三种负载结构,但在图 4.138(b)及(c)的情况下,很难通过测量一个相的功率再乘 3 倍得到三相功率。因此如图 4.139 所示,即使负载联接状态不知道,或者是有若干不同种类负载,那么通过三根进线就不能测量了吗?也就是说,一般如果

能够用线电流  $I_l$  及线电压  $V_l$  来测量三相功率,则与负载状态无关。为此根据负载不同的联接,将用相电流及相电压表示的  $P = 3 E_p I_p \cos \varphi$  重新改写如下:

$$\begin{aligned} \text{Y 联结负载} \rightarrow \begin{cases} V_l = \sqrt{3} E_p \\ I_l = I_p \end{cases} \rightarrow P &= 3 \times \frac{V_l}{\sqrt{3}} I_l \cos \varphi \\ &= \sqrt{3} V_l I_l \cos \varphi \quad [\text{W}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{联结负载} \rightarrow \begin{cases} V_l = E_p \\ I_l = \sqrt{3} I_p \end{cases} \rightarrow P &= 3 \times V_l \frac{I_l}{\sqrt{3}} \cos \varphi \\ &= \sqrt{3} V_l I_l \cos \varphi \quad [\text{W}] \end{aligned}$$

上述两个公式完全相同,而与联结形式无关。另外,即使负载的种类不同,结果也一样。因此将上式作为三相功率的通用计算式。

$$\text{三相功率通用计算式} \quad P = \sqrt{3} V_l I_l \cos \varphi \quad [\text{W}] \quad (2)$$

从式(1)及式(2)可知,三相功率的常数3与 $\sqrt{3}$ 只是三相功率公式的形式不同,内容实际上是一样的。

### 4.16.3 三相视在功率及功率因数

$$\begin{cases} \text{视在功率} = \sqrt{3}VI & [\text{VA}] \\ \text{功率因数} = \frac{P}{\sqrt{3}VI} \times 100 & [\%] \end{cases}$$

### 4.16.4 两功率表法

实际上为了测量三相功率,基本上采用两功率表法,即如图4.140所示,用两个单相功率表进行测量。这种情况下,两个功率表读数之和为三相功率。三相功率表也是采用该两功率表法的测量原理。

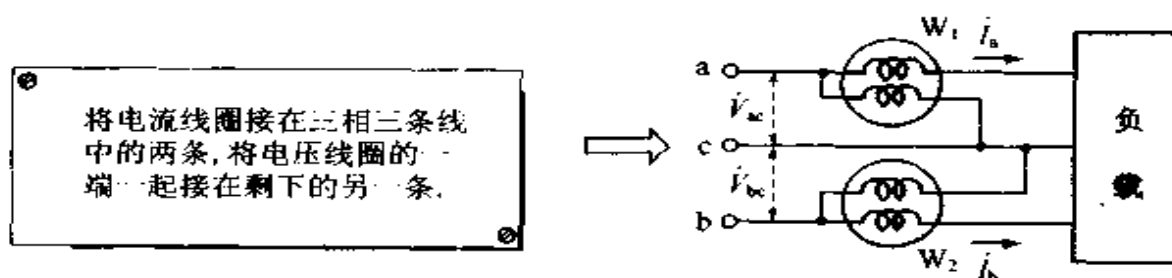


图4.140 两功率表法的接线图

• 用两个单相功率表测量三相功率的原理 图4.140为两功率表法的接线图,图4.141为其矢量图。

功率表 $W_1$ 接在 $a$ 相与 $c$ 相之间,可以说测量的是该单相功率。

$$W_1 \text{ 的功率 } P_1 = V_{ac} I_a \times \cos(\angle V_{ac} \text{ 与 } I_a)$$

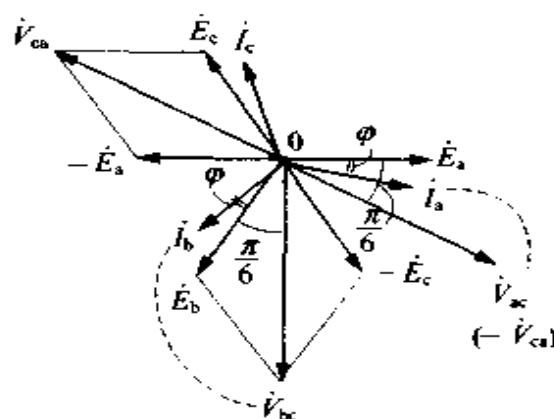


图4.141 两功率表法矢量图

的相位差)

$$= V_l I_l \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right) \quad [\text{W}] \quad (3)$$

功率表  $W_2$  接在 b 相与 c 相之间,可以说测量的是该单相功率。

$W_2$  的功率  $P_2 = V_{bc} I_b \cos(V_{bc} \text{ 与 } I_b \text{ 的相位差})$

$$= V_l I_l \cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right) \quad [\text{W}] \quad (4)$$

这样,若计算  $P_1 + P_2$ , 则

$$\begin{aligned} P &= P_1 + P_2 = V_l I_l \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right) + V_l I_l \cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right) \\ &= V_l I_l \left[ \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right) + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right) \right] \\ &= V_l I_l (\cos 30^\circ \cos \varphi + \sin 30^\circ \sin \varphi + \cos 30^\circ \cos \varphi - \sin 30^\circ \sin \varphi) \\ &= V_l I_l (2 \cos 30^\circ \cos \varphi) = \sqrt{3} V_l I_l \cos \varphi \quad (5) \end{aligned}$$

式(5)与式(2)的三相功率计算式相同,所以两功率表法能测量三相功率。

#### 4. 16. 5 功率表指针反转

在两功率表法中,由表 4. 20 及图 4. 142 可知,若功率因数小于 50% ( $\varphi = 60^\circ$ ),则会出现  $W_1$  及  $W_2$  的某一个功率表指针反转。

表 4. 20

$\varphi$ $P/VI$		$P_1/VI$		$P_2/VI$	
		$\cos(\pi/6 - \varphi)$	$P_1$ 偏转	$\cos(\pi/6 + \varphi)$	$P_2$ 偏转
滞后功率因数	$\pi/6$	$\cos 0^\circ = 1$	+	$\cos 60^\circ = 0.5$	+
	$\pi/3$	$\cos(-30^\circ) = 0.866$	+	$\cos 90^\circ = 0$	+
	$\pi/2$	$\cos(-60^\circ) = 0.5$	+	$\cos 120^\circ = -0.5$	-



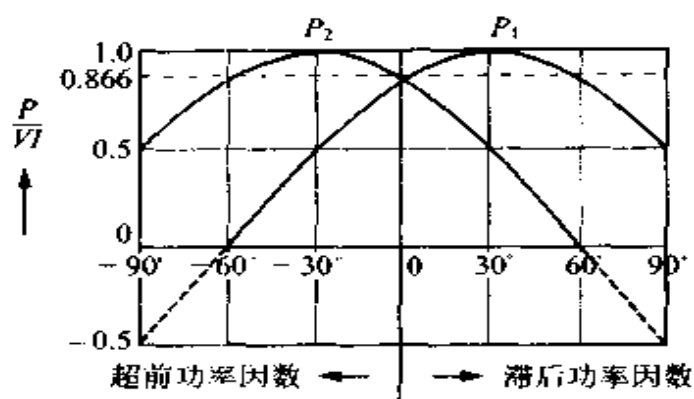


图 4.142 功率表指针偏转及功率因数

这时要改变反转功率表的电压线圈极性(暂时断开电流线圈及电路)(亦可以扳动功率表面板上的指针反转切换开关—译注),使指针正转后,取两读数之差,即为三相功率。

# 4.17 旋转磁场与感应电动机

## 旋转磁场

图 4.143 所示为三相交流产生的磁场变化(1 个周期)。若注意一下从①到⑦的合成磁场方向可知,正好旋转了 1 周。

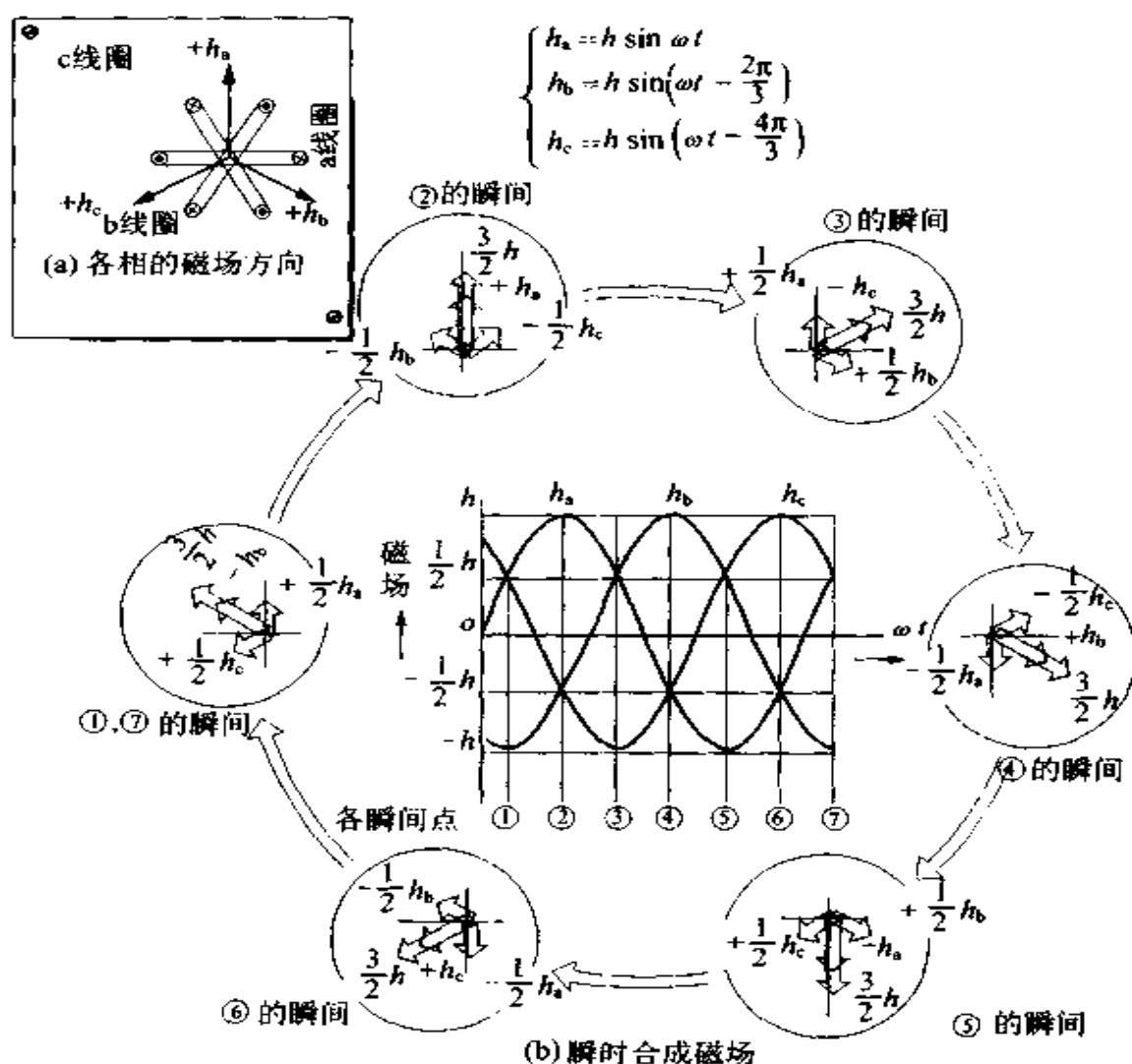


图 4.143 三相交流产生的旋转磁场

## 4.17.1 轮子旋转

图 4.144 为三相感应电动机。现在将该旋转部分(转子)拆掉,将定子部分的定子绕组横过来,放上一个大碗,这如图 4.145 所示。若该定子绕组加上三相交流电压,则放在大碗中的金属轮会不断旋转。

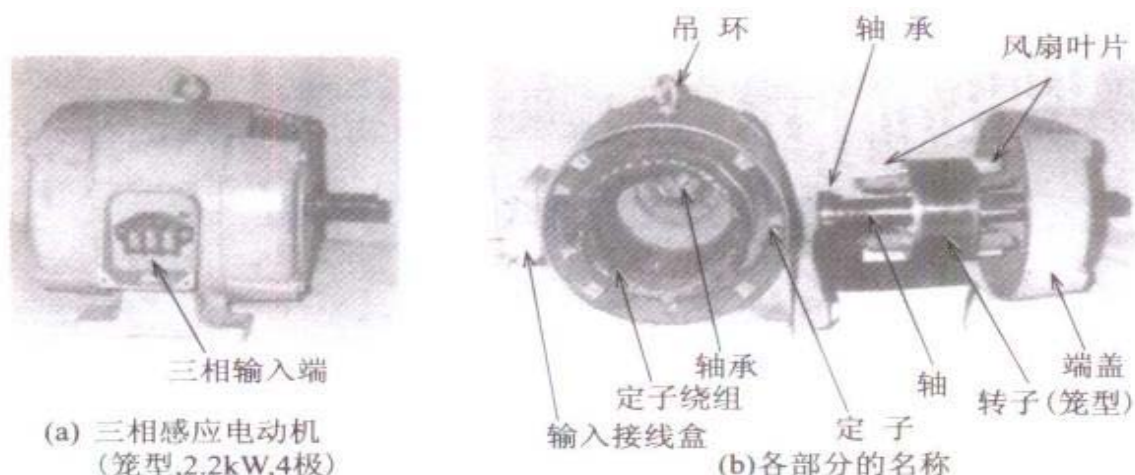


图 4.144 三相感应电动机(笼型)



图 4.145 定子绕组及轮子

为什么会旋转? 这是因为定子绕组产生了旋转磁场, 由于旋转磁场的作用, 使轮子旋转, 这就是感应电动机的原理。

### 4.17.2 磁铁旋转产生的磁场

旋转磁场是怎么一回事？在说明之前先做下面的实验。

在图 4.146 所示的平台上有一个能够旋转的 U 字形永久磁铁，还有一个同样能够旋转的笼型导体<sup>1)</sup>。

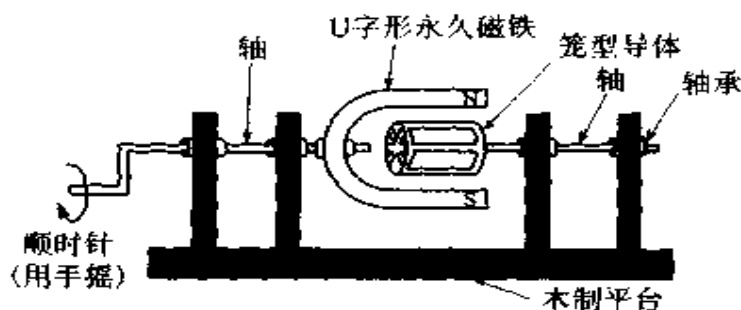


图 4.146 旋转磁场实验

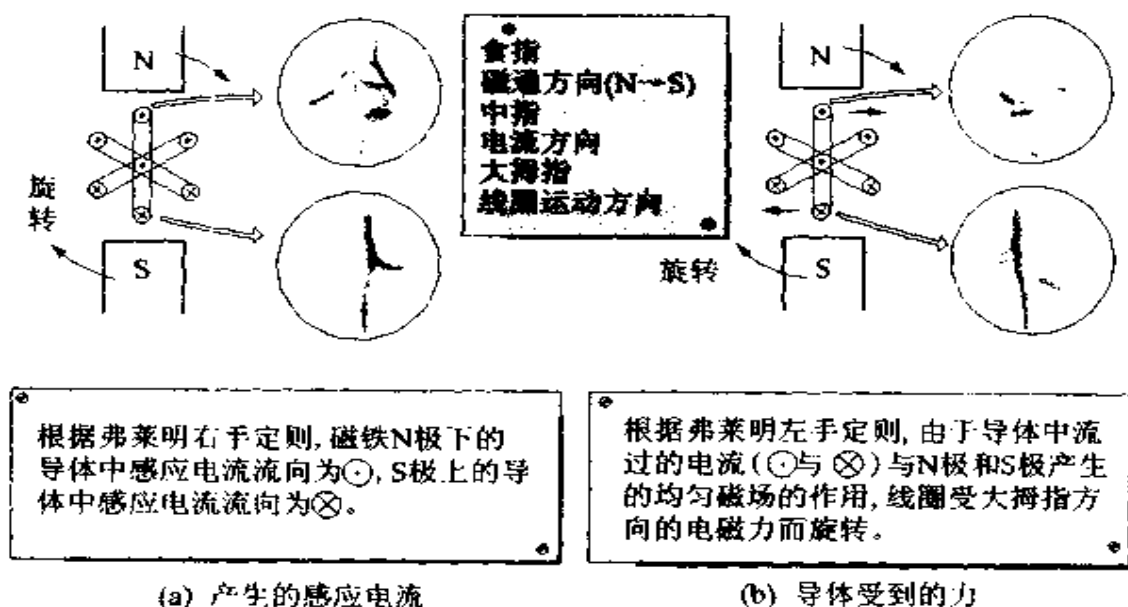


图 4.147 笼型导体的旋转

若用手使该永久磁铁顺时针旋转，则笼型导体也沿永久磁铁

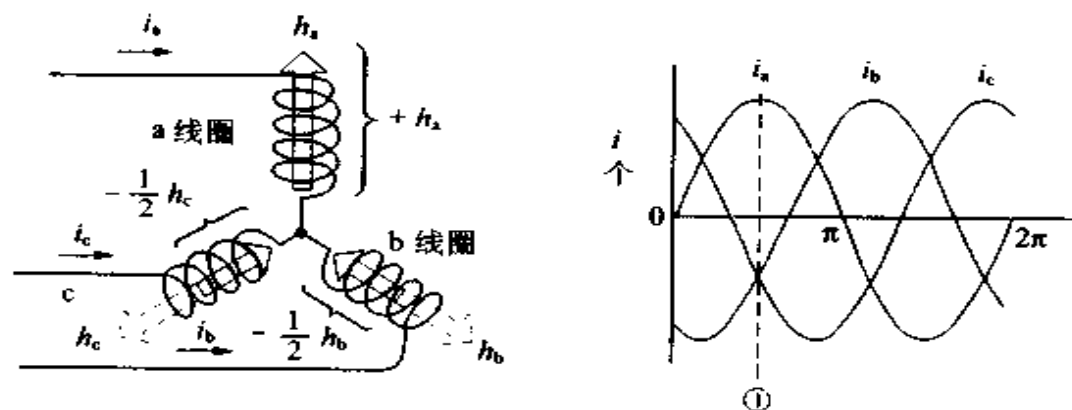
1) 用铝或铜制成的像鸟笼状的笼型旋转体。

旋转方向旋转。这是由于磁铁旋转,在笼型导体的一根一根导体中感应产生图 4.147(a)所示的电动势,该电动势在笼型导体中流过短路电流。该感应电流与永久磁铁  $NS$  间的磁通的作用,对笼型导体产生图(b)箭头方向所示的电磁力,从而产生旋转。图 4.147 所示为该旋转产生的过程。

### 4.17.3 三相交流产生旋转磁场

能不能利用电使磁场旋转,来代替上述实验中用手使磁铁旋转?若利用三相交流,就能够办到。即如下所述,在静止的三个绕组中通以三相交流,就能够产生旋转磁场。

如图 4.148(a)所示,在空间分别相差  $2\pi/3$  ( $120^\circ$ ) 的三个绕组  $a$ 、 $b$ 、 $c$  中,流过图(b)所示的三相电流。各绕组产生与电流成正比的磁场。该磁场的大小及方向也随时间而变。



(a) 右图 ① 的瞬间各线圈的磁场大小及方向(线圈绕向按图规定)

(b) 三相交流电流

图 4.148 三个绕组及各绕组产生的磁场

在图 4.148(b)的三相电流①的瞬间,各绕组中产生的磁场大小如图(a)中  $\odot$  所示,即如表 4.21 所示。各绕组产生的磁场大小及方向不一样,将该三个磁场通过向量合成,则如图 4.149 所示。若计算其大小,则为  $(3/2)h$ ,  $h$  为一个绕组产生磁场的最大值。

图 4.143 所示为 1 个周期( $2\pi$ )的情况,合成磁场是大小为

$(3/2)h$ 、沿相位滞后的相的顺序方向旋转的旋转磁场。

这就是利用三相交流产生的旋转磁场,是用电使磁场旋转的方法。

表 4.21 磁场的大小及方向

线圈	产生的磁场
a 线圈	+ 方向为最大( $h$ )
b 线圈	- 方向为 $1/2(1/2h)$
c 线圈	- 方向为 $1/2(1/2h)$

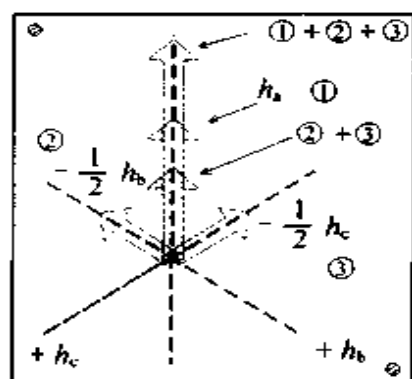


图 4.149 磁场合成

#### 4.17.4 旋转磁场反转

图 4.143 的合成磁场旋转方向是与时钟指针相同的顺时针方向,即旋转磁场沿相位滞后的相的顺序方向旋转。因此若将三相的两根线(如 b 相与 c 相)对调,如图 4.150(a)变为(b),则旋转磁场方向变为逆时针。旋转方向由相序来决定。因而,为了改变三相交流产生的旋转磁场旋转方向,只要将三相交流的两根线对调即可,非常简单。利用该旋转磁场的三相感应电动机也能够很简单地改变旋转方向。

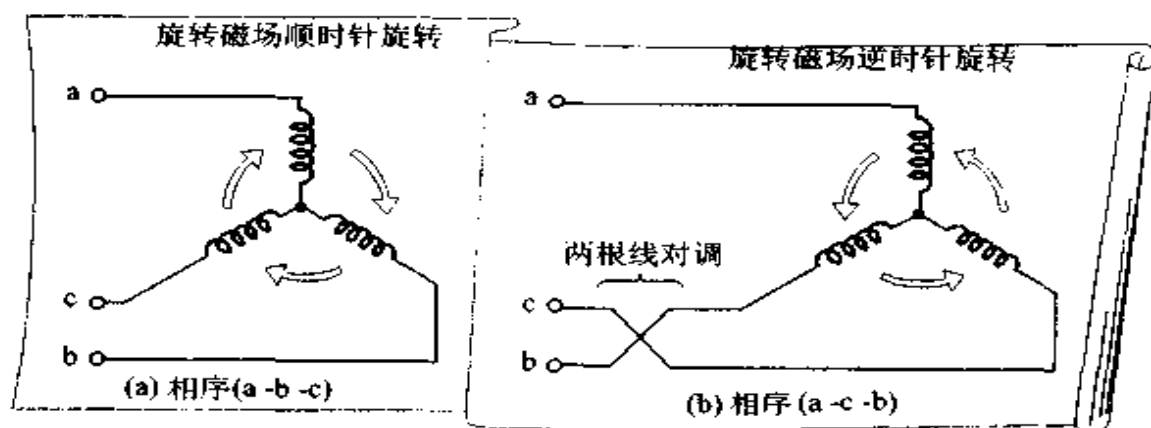


图 4.150 相序与旋转磁场方向

# 4.18 不对称三相电路

表 4.22

	电 源	负 载	相电流·线电流
对称三相电路	对称三相电源	各相负载相等	大小相等, 各相相位差为 $2\pi/3$ 。
不对称三相电路		各相负载不相等	大小不相等, 或大小即使相等, 但各相相位差不是 $2\pi/3$ 。

## 不对称负载举例

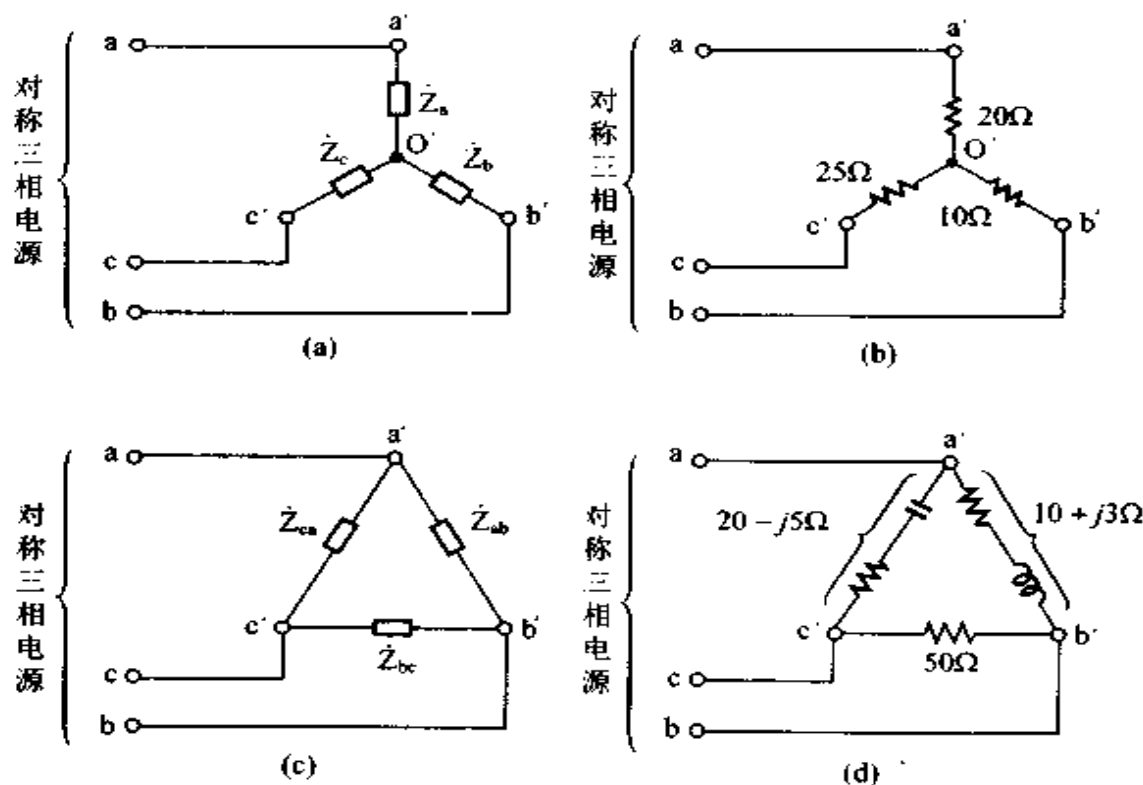



图 4.151 三相不对称负载(注意各相负载的值)

## 4.18.1 不对称三相电路

前面讨论的是电源为对称三相电源、负载为各相都相同的三相对称电路。因而在求相电流或线电流时,只要计算一相,其他相只要将相位各滞后  $2\pi/3$  就可求得。

但与上不同的是,如表 4.22 所示的不对称电路,即使电源是对称三相电源,但由于各相负载不相同,因此相电流或线电流的大小不同,相位差也不是相差  $2\pi/3$ 。这样的电路称为不对称三相电路。三相对称电路的处理方法如同单相电路那样,而不对称三相电路则不同,要稍微复杂一点。

## 4.18.2 不对称三相电路的求解方法

 图 4.152 所示为有中性线的三相不对称电路,试求  $\dot{I}_a$ 、 $\dot{I}_b$ 、 $\dot{I}_c$ 、 $\dot{I}_0$ ,并画矢量图。已知

$$\dot{E}_a = 100 \angle 0^\circ \text{V} \quad Z_a = 20\Omega$$

$$\dot{E}_b = 100 \angle -\frac{2\pi}{3} \text{V} \quad Z_b = 10\Omega$$

$$\dot{E}_c = 100 \angle -\frac{4\pi}{3} \text{V} \quad Z_c = 25\Omega$$

解答:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{E}_a}{Z_a} = \frac{100 \angle 0}{20} = 5 \angle 0 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_b &= \frac{\dot{E}_b}{Z_b} = \frac{100 \angle -(2\pi/3)}{10} \\ &= 10 \angle -\frac{2\pi}{3} \text{ A} \end{aligned}$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{E}_c}{Z_c} = \frac{100 \angle -(4\pi/3)}{25} = 4 \angle -\frac{4\pi}{3} \text{ A}$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 5 + 10 \angle -\frac{2\pi}{3} + 4 \angle -\frac{4\pi}{3}$$

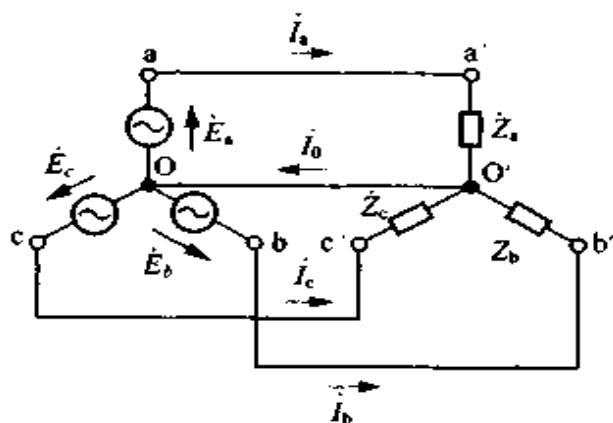


图 4.152



$$= 5 + 10 \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + 4 \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$= -2 - j3\sqrt{3} \text{ A}$$

$$I_0 = \sqrt{2^2 + (3\sqrt{3})^2} = \sqrt{31} = 5.6 \text{ A}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{3\sqrt{3}}{2} = 68.9^\circ$$

$$\longrightarrow \dot{I}_a = 5 \text{ A}$$

$$\dot{I}_b = 10 \angle -(2\pi/3) \text{ A}$$

$$\dot{I}_c = 4 \angle -(4\pi/3) \text{ A}$$

$$\dot{I}_0 = -2 - j3\sqrt{3} \text{ A}$$

矢量图如图 4.153 所示。

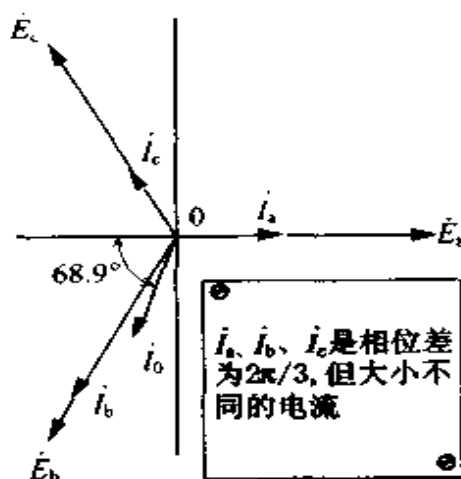


图 4.153 矢量图

#### 4.18.3 Y联结与△联结的负载

图 4.154(a) 的 Y 联结可采用基尔霍夫定律, 列出下列等式, 然后求解:

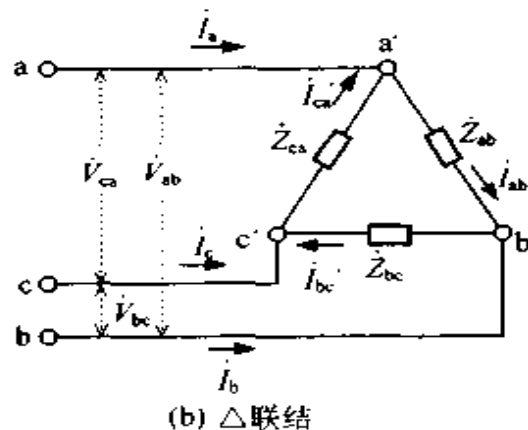
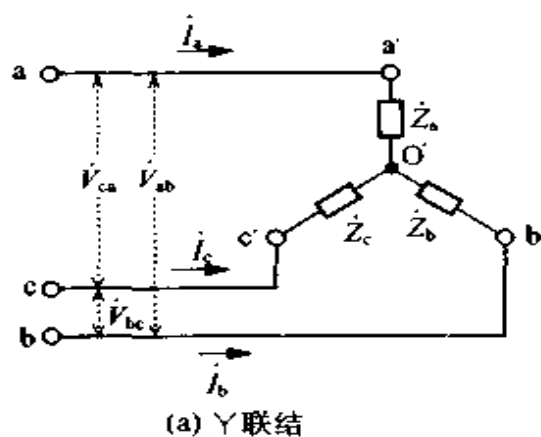


图 4.154 不对称三相电路

在中点  $O'$   $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$

在  $a'b'$  之间  $\dot{Z}_a \dot{I}_a - \dot{Z}_b \dot{I}_b = \dot{V}_{ab}$

在  $b'e'$  之间  $\dot{Z}_b \dot{I}_b - \dot{Z}_c \dot{I}_c = \dot{V}_{bc}$

图 4.154(b) 的  $\Delta$  联结, 由于各线电压加在各相负载上, 因此流过负载的电流如下所示:

$$\dot{I}_{ab}' = \frac{\dot{V}_{ab}}{\dot{Z}_{ab}} \quad \dot{I}_{bc}' = \frac{\dot{V}_{bc}}{\dot{Z}_{bc}} \quad \dot{I}_{ca}' = \frac{\dot{V}_{ca}}{\dot{Z}_{ca}}$$

## 4.19 非正弦交流

### 变压器的波形

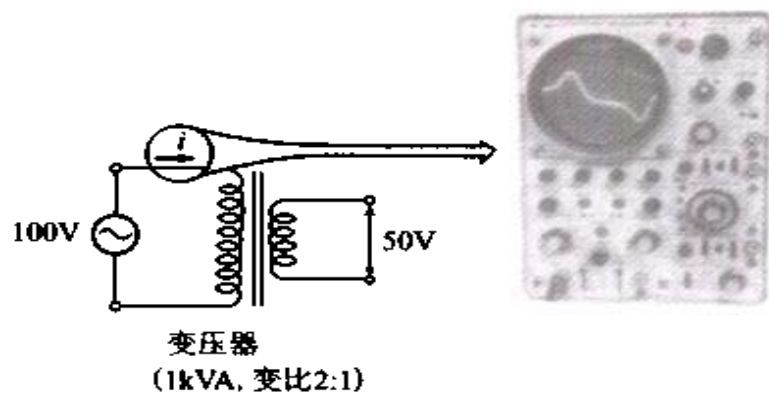


图 4.155 变压器空载电流

### 荧光灯的波形

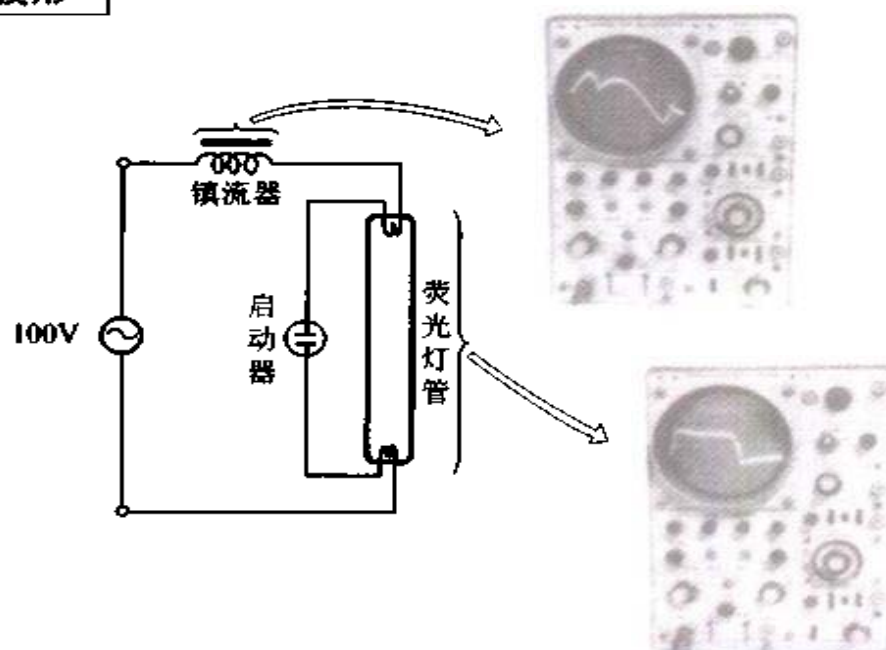


图 4.156 镇流器及荧光灯管两端的电压

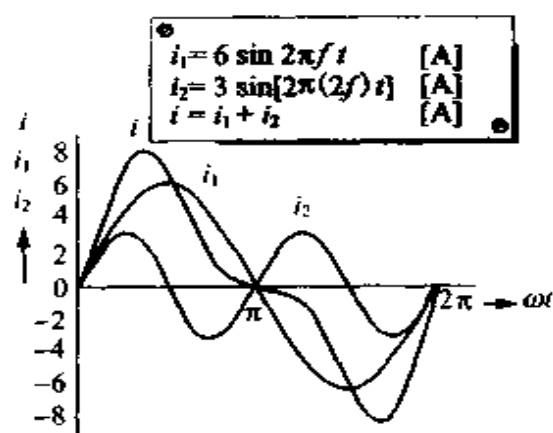


图 4.157 不同频率正弦波的合成

## 4.19.1 所谓非正弦

图 4.157 中所示的波形  $i$  与前面学过的波形不同,它不是正弦波。

这样的波形一般称为非正弦交流(或称为失真的交流)。该波形  $i$  是正弦交流  $i_1$  与  $i_2$  的合成,但  $i_1$  与  $i_2$  的频率不同,频率比为 1:2。

## 4.19.2 非正弦交流的分解

图 4.158(a)及(b)的波形  $i$  也是由  $i_1$  及  $i_2$  的正弦交流合成的。反之也可以说,能够将波形  $i$  分解为正弦交流的  $i_1$  及  $i_2$ 。

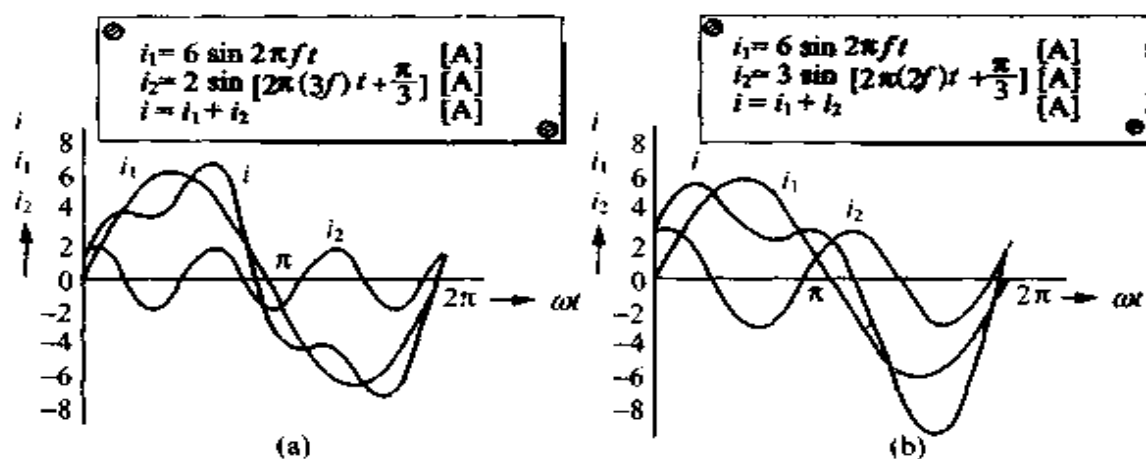


图 4.158 频率及相位不同的正弦交流合成

一般非正弦交流能够分解为几个正弦交流,再作为前面学习过的正弦交流进行处理。

### 4.19.3 基波与高次谐波

将非正弦波分解为几个正弦波时,根据其频率可以分为**基波**与**高次谐波**。所谓基波是具有与原来非正弦波相同频率分量的正弦波,而高次谐波具有基波的整数倍频率分量。其中将频率为基波频率2倍的称为二次谐波,3倍的称为三次谐波, $n$ 倍的称为 $n$ 次谐波。另外,有时还包含直流分量。

## 本章小结

### 交 流

是大小及方向按周期性变化的电压及电流,不同频率的交流有各种不同的用途。

### 交流波形

按正弦波变化的交流称为正弦交流,电流及电压的瞬时表达式如下所示( $I_m$ 及 $E_m$ 为最大值, $I$ 及 $E$ 为有效值):

$$i = I_m \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t \quad [\text{A}]$$

$$e = E_m \sin \omega t = \sqrt{2} E \sin \omega t \quad [\text{V}]$$

### 交流的大小

表示方法有最大值、平均值、有效值三种,其中有效值在实际中用得最多。三者关系如下所示:

$$\text{平均值} \quad I_{av} = \frac{2}{\pi} I_m \quad [\text{A}] \quad E_{av} = \frac{2}{\pi} E_m \quad [\text{V}]$$

$$\text{有效值} \quad I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m \quad [\text{A}] \quad E = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m \quad [\text{V}]$$

### 有效值

用瞬时值平方的平均的平方根表示。

若表示电流,则为 $I = \sqrt{i^2}$ 的平均。一般交流的大小用有效值表示。

### 相位差

是正弦交流变化的时间之差,该差值用电角度 $[\text{rad}]$ 表示。

### 正弦交流表示法

正弦交流可用波形或瞬时值表示,但若用矢量或复数来表示,就更方便,计算也更容易。

### 纯 RLC 电路的电压、电流与相位关系

	$E$ 与 $I$ 的关系	$I$ 的相位(以电压为基准)
电阻电路	$I = E/R$	同相
电感电路	$I = E/(\omega L)$	滞后 $\pi/2$
电容电路	$I = E/[1/(\omega C)]$	超前 $\pi/2$

### RLC 串联电路

电压  $E$ 、电流  $I$  与相位差  $\varphi$  的关系如下:

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2}} \quad [\text{A}]$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L - 1/(\omega C)}{R} \quad [\text{rad}]$$

式中,  $\omega L = 1/(\omega C)$  时, 电流与电压同相;

$\omega L > 1/(\omega C)$  时, 电流滞后于电压;

$\omega L < 1/(\omega C)$  时, 电流超前于电压。

$\omega L = 1/(\omega C)$  时, 电压  $E$  与电流  $I$  同相, 电流为最大 ( $I = E/R$ )。这称为串联谐振, 谐振频率  $f_0$  为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}]$$

### RLC 并联电路

阻抗  $Z$  与相位如下所示:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{(1/R)^2 + [\omega C - 1/(\omega L)]^2}} \quad [\Omega]$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \omega C - \frac{1}{\omega L} \right) R \quad [\text{rad}]$$

$\omega L = 1/(\omega C)$  时, 产生并联谐振, 这时流过电源的电流为最小。并联谐振频率也与串联谐振频率相同。

### 符号法

用复数表示交流电路矢量的方法称为符号法。能利用代数方法来处理复杂的交流电路, 因此非常方便, 获得广泛应用。采用下述的表示方法:

$$\dot{X}_L = j\omega L [\Omega] \quad \dot{X}_C = -j \frac{1}{\omega C} [\Omega]$$

$$\dot{Z} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) [\Omega]$$

## 负 载

单相交流电路的负载一般比较多的是电阻  $R$  (利用电热丝) 或电感  $L$  (利用电动机), 因此电流相位一般滞后于电压。

## 单相交流电路功率

$$P = EI \cos \varphi \quad [\text{W}]$$

式中,  $EI$  称为视在功率  $[\text{VA}]$ ,  $\cos \varphi$  称为功率因数, 一般以百分数表示。

## 三相交流

有对称三相交流与不对称三相交流两种。

## 对称三相交流的电压与电流

- (1) 各相大小相同。
- (2) 各相频率相同。
- (3) 各相相位差分别为  $2\pi/3$ 。
- (4) 三相瞬时值之和始终为零。

## 三相交流联结

有  $Y$  联结、 $\Delta$  联结、 $V$  联结等。其中多采用  $Y$  联结与  $\Delta$  联结。

## $Y$ 联结

- (1) 线电压 ( $\dot{V}_l$ ) 与相电压 ( $\dot{E}_p$ ) 之间

$$\dot{V}_l = \sqrt{3} \dot{E}_p \angle \pi/6 \quad [\text{V}]$$

- (2) 线电流 ( $\dot{I}_l$ ) 与相电流 ( $\dot{I}_p$ ) 之间

$$\dot{I}_l = \dot{I}_p \quad [\text{A}]$$

## $\Delta$ 联结

- (1) 线电流 ( $\dot{I}_l$ ) 与相电流 ( $\dot{I}_p$ ) 之间

$$\dot{I}_l = \sqrt{3} \dot{I}_p \angle -(\pi/6) \quad [\text{A}]$$

- (2) 线电压 ( $\dot{V}_l$ ) 与相电压 ( $\dot{E}_p$ ) 之间

$$\dot{V}_l = \dot{E}_p \quad [\text{V}]$$

## $V$ 联结

是  $\Delta$  联结拿掉一相, 但是线电压与  $\Delta$  联结相同。



### 对称三相电路功率

$$P = \sqrt{3}VI\cos\varphi [\text{W}]$$

式中,  $V$  为线电压,  $I$  为线电流,  $\cos\varphi$  为负载功率因数。

### 两功率表法

是测量三相电路功率的方法。将两个单相功率表接在三相中的两个相间,再求两功率表读数之和,即为三相功率。

### 旋转磁场

在空间相差  $2\pi/3$  角设置的三个绕组中流过三相电流,就产生旋转磁场。它用于三相感应电动机。

### 不对称三相电路的求解

不象对称三相电路那样简单。它根据不同电路,采用欧姆定律、基尔霍夫定律等进行求解。

### 不同频率的正弦波合成

会产生非正弦交流。反之,理论上可以将非正弦交流分解为几个正弦交流。

### 对称三相电路功率

$$P = \sqrt{3}VI\cos\varphi [\text{W}]$$

式中,  $V$  为线电压,  $I$  为线电流,  $\cos\varphi$  为负载功率因数。

### 两功率表法

是测量三相电路功率的方法。将两个单相功率表接在三相中的两个相间,再求两功率表读数之和,即为三相功率。

### 旋转磁场

在空间相差  $2\pi/3$  角设置的三个绕组中流过三相电流,就产生旋转磁场。它用于三相感应电动机。

### 不对称三相电路的求解

不象对称三相电路那样简单。它根据不同电路,采用欧姆定律、基尔霍夫定律等进行求解。

### 不同频率的正弦波合成

会产生非正弦交流。反之,理论上可以将非正弦交流分解为几个正弦交流。